



**João Tomás Varela  
Álvaro**

**MELHORIA DE UMA CÉLULA DE PRODUÇÃO  
GARGALO NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL: UMA  
ABORDAGEM COM RECURSO À SIMULAÇÃO DE  
PROCESSOS**

**IMPROVEMENT OF A BOTTLENECK  
MANUFACTURING CELL IN THE AUTOMOTIVE  
INDUSTRY: AN APPROACH USING DISCRETE  
EVENT SIMULATION**



**João Tomás Varela  
Álvaro**

**MELHORIA DE UMA CÉLULA DE PRODUÇÃO  
GARGALO NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL: UMA  
ABORDAGEM COM RECURSO À SIMULAÇÃO DE  
PROCESSOS**

**IMPROVEMENT OF A BOTTLENECK  
MANUFACTURING CELL IN THE AUTOMOTIVE  
INDUSTRY: AN APPROACH USING DISCRETE  
EVENT SIMULATION**

Relatório de Projeto apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, realizado sob a orientação científica da Prof. Doutora Ana Raquel Reis Couto Xambre, Professora Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho a toda a minha família, por todo o apoio que me deram ao longo de toda a minha vida. Sem eles, não teria sido possível chegar onde cheguei. Concluo esta etapa da minha vida com uma enorme sensação de alívio e felicidade pois sei que a partir deste momento terei as bases necessárias para atingir os meus objetivos profissionais. De hoje em diante, o meu futuro só de mim dependerá.

## **o júri**

presidente

**Prof.<sup>a</sup> Doutora Ana Maria Pinto de Moura**

Professora Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo da Universidade de Aveiro

**Prof.<sup>a</sup> Doutora Vera Lúcia Miguéis Oliveira e Silva**

Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Prof.<sup>a</sup> Doutora Ana Raquel Reis Couto Xambre**

Professora Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Chega assim ao fim uma grande etapa da minha vida... o fim de um capítulo que certamente marcará para sempre aqueles que tiveram a oportunidade de me ver crescer, assim como aqueles que me acompanharam de perto nos últimos anos. A esses dedico este espaço.

Aos meus pais, avós e restante família, um primeiro agradecimento por todo o apoio que me deram e pelo investimento que fizeram na minha educação nestes 24 anos. Sem eles não teria sido possível.

Aos meus amigos, por todos os momentos passados ao longo dos últimos anos, assim como pelo apoio e incentivo a ir mais e mais além. Sem eles, nada teria feito sentido. Entre estes, gostava de deixar uma palavra de agradecimento especial a um amigo e colega de curso com quem partilhei a minha primeira experiência internacional ao longo de 10 meses em Budapeste. Não tenho qualquer dúvida de que também graças a ele tive o privilégio de viver o melhor ano da minha vida, assim como aprender a lidar com as barreiras do dia-a-dia para um dia podermos chegar onde sempre ambicionámos.

Um agradecimento especial àquele que tem sido meu mentor a nível profissional, o meu padrinho de baptismo, Miguel Coelho, antigo aluno do curso de Engenharia e Gestão Industrial na Universidade de Aveiro, que me tem guiado e transmitido conhecimentos/conselhos para que possa chegar o mais longe possível.

Ao Engenheiro Nuno Martinho, pelo acompanhamento tão próximo, dedicação e disponibilidade imensuráveis. Por todo o companheirismo e amizade desenvolvidos, por toda a aprendizagem e confiança em mim para a realização de tarefas que me fizeram evoluir e tirar o máximo proveito desta experiência profissional.

À orientadora do projeto, Ana Raquel Xambre, pela dedicação e entrega na orientação, por todos os conselhos transmitidos. Por me ter indicado o caminho que penso ser o certo e que fez chegar este relatório a bom porto.

A todos os Engenheiros, Trabalhadores e Operários da Mahle, Componentes de Motores, S.A., sem excepção, pelos conhecimentos transmitidos nas mais vastas áreas e por terem, também, contribuído para uma melhor e mais marcante experiência.

A todos, um sincero obrigado!

## palavras-chave

Melhoria do Desempenho Industrial; Software Flexsim; Simulação de Processos; Automação; Ergonomia

## resumo

O presente projeto, levado a cabo numa célula de produção gargalo, de uma organização do setor automóvel, focou-se em três problemas centrais contextualizados pelos objetivos do projeto. Em síntese, existiu um primeiro problema de necessidade de melhoria do rendimento operacional da célula gargalo devido ao excesso de tempo não produtivo observado, em segundo, um problema de necessidade de melhoria do processo a nível ergonómico para os operadores e, em terceiro, a falta de capacidade de produção prevista para os próximos anos.

Os objetivos do projeto consistiram, primeiramente, no aumento do rendimento operacional da célula de produção e, ainda, na conceção de uma solução com vista a melhorar a ergonomia deste posto de trabalho presente na linha de produção de segmentos de motores, de forma a satisfazer o aumento da procura dos clientes.

Para alcançar os objetivos propostos foi utilizada uma metodologia baseada nas seguintes fases: estudo da situação inicial, implementação de um método de trabalho standardizado, elaboração de uma proposta de investimento por forma a aumentar a capacidade da célula através de um método analítico, simulação do impacto das medidas propostas, concluindo com uma comparação entre os diferentes resultados obtidos.

Foram realizados estudos intensivos da célula de produção, ao nível da sua natureza operacional, para identificar pontos relevantes do processo produtivo que necessitavam de intervenção, tendo sido ainda necessário recorrer a estudos de tempos.

Um primeiro estudo foi direcionado ao método produtivo do posto e o segundo estudo foi mais focado na medição do trabalho dos operadores.

Foi possível atingir os objetivos propostos para o projeto, nomeadamente o aumento do rendimento operacional assim como a melhoria da sua ergonomia através da implementação do método de trabalho standardizado. Foi também apresentada uma proposta de investimento que deverá ser iniciada já este ano para que se possa iniciar a produção dos novos componentes a partir de 2020. Consequentemente, foi possível obter outras melhorias tais como a estabilização do fluxo de produção e a melhoria do clima social na célula que, *a posteriori*, originou um melhor trabalho em equipa dos operadores dos diferentes turnos.

Com a implementação das medidas estudadas será possível satisfazer a procura dos clientes até 2023, o que anteriormente, previsivelmente, só seria possível até 2019.

## **keywords**

Industrial Performance Improvement; Flexsim Software; Discrete Event Simulation; Automation; Ergonomics

## **abstract**

This project, carried out in a bottleneck production cell, of an automotive sector organization, focused on three central issues contextualized by the project's objectives. Basically, there was a first problem regarding the need to improve the operational performance of the bottleneck cell due to the existent excessive non-productive time, secondly, a problem regarding the need to improve the process ergonomically for the operators and, thirdly, the lack of production capacity for the coming years.

The objectives of the project were, predominantly, to increase the operational performance of the production cell and, moreover, to design a solution to improve the ergonomics of this workstation, that is part of the engine piston rings' production line, in order to satisfy the increase of customers' demand. In order to reach the proposed objectives, a methodology was used based on the following phases: study of the initial situation, implementation of a standardized working method, development of an investment proposal so as to increase the cell's capacity through an analytical method, simulation of the impact of the proposed changes, finishing with a comparison between the different results.

Intensive studies of the production cell were carried out, in terms of its operational nature, to identify relevant points in the production process that needed some intervention, and it was also necessary to use time studies. A first study was directed at the production method of the station and the second study was more focused on the time measurement of the operators' work.

It was possible to achieve the proposed objectives for the project, namely the increase in operational performance as well as an improvement of its ergonomics through the implementation of the standardized working method. An investment proposal has also been presented and should be carried out this current year so production of the new components can begin in 2020.

Subsequently, other improvements such as the stabilization of the production flow and the improvement of the social atmosphere in the work cell could be obtained, which has led to better teamwork among the different shift operators. With the implementation of the studied changes, it will be possible to satisfy customers' demand until 2023, which before was only possible until 2019.





## Índice

1.	Introdução .....	1
1.1	Objetivos do projeto .....	1
1.2	Enquadramento .....	2
1.3	Estrutura do projeto .....	3
2.	Enquadramento do trabalho .....	5
2.1	Motor alternativo de combustão interna .....	5
2.1.1	Produto – Segmentos de pistão .....	6
2.1.2	Coberturas ou Revestimentos .....	8
2.2	Fluxograma do processo de fabrico (3 peças) .....	9
2.3	Célula 21 .....	11
2.4	Simulação .....	12
2.4.1	Cenários para utilização de modelos de simulação .....	12
2.4.2	Ocasões em que a simulação não deve ser utilizada .....	13
2.4.3	Vantagens da simulação .....	13
2.4.4	Desvantagens da simulação .....	13
2.4.5	Passos para realização de uma simulação .....	14
2.4.6	O caminho para o sucesso da simulação .....	15
2.4.7	Número de replicações .....	16
2.5	Recolha e preparação de dados .....	18
2.5.1	Fontes de aleatoriedade .....	18
2.5.2	Identificação da distribuição de dados .....	18
3.	<i>Softwares</i> de simulação .....	19
3.1	<i>Arena software</i> .....	19
3.2	<i>FlexSim</i> .....	19
3.3	Comparação de <i>softwares</i> .....	20
4.	Caso / metodologia .....	21
4.1	Processo produtivo .....	21
4.2	Célula 21 - Gargalo da Sub-Linha “Anel 3 peças” .....	23
4.2.1	<i>Layout</i> da Célula 21 .....	24
4.2.2	Composição .....	24
4.2.3	Estrutura e organização .....	25
4.2.4	Intervenientes .....	26

4.2.5	Fluxo da bobina na Célula 21.....	26
4.2.6	Tempos standard dos processos por tecnologia de anel .....	26
5.	Dados recolhidos.....	29
5.1	Plano de vendas 2018-2023 .....	29
5.2	Método produtivo da Célula 21 de 2018 .....	30
5.3	Frequência e tempo de paragens.....	31
5.4	Gráfico de Gantt dos processos .....	33
5.4.1	Processo completo.....	33
5.4.2	Processo “Pré-PVD” .....	35
5.5	Diagrama de deslocações .....	36
6.	Resultados .....	39
6.1	Introdução de um Método de Trabalho Padronizado .....	39
6.1.1	Comparação de cenários – Outubro 2018 VS MTP.....	40
6.1.2	Diagrama de deslocações conforme MTP .....	42
6.2	Sistema de descarga automática.....	43
6.2.1	Método de funcionamento .....	43
6.2.2	Diagrama de deslocamento com descarga automática .....	44
6.2.3	Desvantagens .....	44
6.2.4	Vantagem .....	45
6.3	Estudo analítico de cenários para a melhoria da Célula 21 .....	45
6.3.1	<i>Output</i> futuro .....	46
6.3.2	Cenários abordados .....	47
6.3.3	Análise e conclusão dos resultados .....	49
6.3.4	Mini-Célula Pré-PVD.....	50
6.3.5	Proposta de investimento – Output estimados.....	52
6.4	Simulação do processo da Célula 21 através do FlexSim.....	54
6.4.1	Recolha de dados.....	54
6.4.2	Validação .....	57
6.4.3	Cenários simulados .....	59
6.5	Carga de trabalho dedicada à Mini-Célula Pré-PVD .....	66
6.6	Mudança de <i>layout</i> para melhoria do <i>output</i> da Célula 21 .....	67
7.	Discussão .....	69
8.	Conclusões.....	73

Referências Bibliográficas .....	75
Anexos.....	77

## Índice de Figuras

Figura 1 – Motor alternativo de combustão interna .....	5
Figura 2 – Vista seccionada de um pistão e respetivos segmentos.....	6
Figura 3 – Ilustração dos três tipos de segmentos produzidos .....	7
Figura 4 – Funcionamento dos segmentos .....	7
Figura 5 – Anel I-Shaped .....	8
Figura 6 – Anel 3 peças .....	8
Figura 7 – Máquina PVD – câmara de revestimento .....	9
Figura 8 – Fluxograma do macro processo de um segmento Nitretado com PVD na Sub-Linha do “3 peças” .....	10
Figura 9 – Ilustração da complexidade produtiva relativa à Célula 21 nos anéis com PVD .....	11
Figura 10 – Micro processo relativo à Célula 21.....	11
Figura 11 – Passos de um estudo de simulação de processos .....	14
Figura 12 – Método de funcionamento para determinar o número de replicações suficientes .....	17
Figura 13 – <i>Layout</i> Célula 21 (Outubro 2018) - Descrição das máquinas presentes .....	24
Figura 14 – Intervenientes da Célula 21.....	26
Figura 15 – Operações realizadas pelo operador na Célula 21 .....	26
Figura 16 – Plano de vendas 2018-2023, Segmentos da Sub-Linha “Anel 3 peças” .....	29
Figura 17 – Produção da Célula 21 em 2018 .....	30
Figura 18 – Pareto de frequência de paragens na Célula 21 .....	31
Figura 19 – Pareto de tempo de paragens na Célula 21 .....	31
Figura 20 – Caixa de refugo aplicada na folha de registo .....	32
Figura 21 – Diagrama de deslocações do operador.....	37
Figura 22 – MTP aplicado e implementado na Célula 21.....	39
Figura 23 – Aplicação do MTP na Célula 21 .....	40
Figura 24 – Diagrama de deslocações do operador conforme MTP.....	42
Figura 25 – Protótipo de descarga automática .....	43
Figura 26 - Diagrama de Deslocamento do operador (MTP com descarga automática).....	44
Figura 27 – Procura 2019-2023   <i>Output</i> máximo da Célula 21 para 230 e 270 dias.....	47
Figura 28 – Gráfico de capacidade da Célula 21 a 270 dias até 2023 .....	50
Figura 29 – Previsão de capacidade por cenário a 230 dias com a Mini Célula Pré-PVD .....	51
Figura 30 – Previsão de capacidade por cenário a 270 dias com a Mini Célula Pré-PVD .....	52
Figura 31 – Proposta de investimento para 2020 a 230 dias .....	53
Figura 32 – Entidade .....	54
Figura 33 – Diagrama BPMN do modelo de simulação   Diagrama de fluxo .....	56
Figura 34 – <i>Process Flow</i> – Criação, <i>Setup</i> , Transporte e Lavagem .....	58
Figura 35 – C21, Sala de Metrologia e paragens do operador .....	58
Figura 36 – <i>Layout</i> modelo FlexSim - Outubro 2018 .....	59
Figura 37 – Modelo FlexSim – Cenário 1.....	60
Figura 38 – Dados fornecidos pelo FlexSim – Cenário 1 .....	62
Figura 39 – <i>Layout</i> cenário 3 – Aproximação de máquinas .....	63
Figura 40 – <i>Layout</i> Cenário 6 – Robot + Operador .....	65
Figura 41 – Esquema comparativo de dois cenários para o estudo do <i>layout</i> .....	67

Figura 42 – Desenho de <i>layout</i> sugerido através do FlexSim .....	68
Figura 43 – 1º passo da proposta de investimento   <i>Robot</i> .....	72
Figura 44 – 2º passo da proposta de investimento   Mini-Célula Pré PVD.....	72

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Cronograma da calendarização do projeto .....	3
Tabela 2 – Comparação de características de desempenho de softwares de simulação .....	20
Tabela 3 – Método de trabalho da Célula 21 e caracterização de ANs (2018) .....	21
Tabela 4 – Capacidade produtiva da Sub-Linha “Anel 3 peças”, referente aos processos de menor produtividade .....	23
Tabela 5 – Descrição das máquinas da Célula 21 – Sub-Linha “Anel 3 peças” .....	25
Tabela 6 – Método operativo da Célula 21 .....	25
Tabela 7 – Tecnologias de segmentos na Célula 21.....	25
Tabela 8 – Tempo e parâmetros de processamento por tipo de segmento da Célula 21 .....	27
Tabela 9 – Gráfico de <i>Gantt</i> do Processo Pós-PVD .....	34
Tabela 10 – Ocupação dos recursos da Célula 21.....	35
Tabela 11 – Gráfico de <i>Gantt</i> do processo Pré-PVD .....	36
Tabela 12 – Testes realizados sem MTP e com MTP .....	41
Tabela 13 – Previsão da procura 2019-2023 com quantidades de segmentos PVD descriminadas .....	45
Tabela 14 – Output máximo da Célula 21 em 2018.....	46
Tabela 15 – Cenários possíveis .....	48
Tabela 16 – <i>Output</i> estimado para 230 dias para os diferentes cenários.....	48
Tabela 17 – <i>Output</i> estimado para 270 dias para os diferentes cenários.....	49
Tabela 18 – Previsão de capacidade para 270 dias .....	49
Tabela 19 – Proposta de Investimento para o projeto com base em valores estimativos .....	52
Tabela 20 – Recursos do modelo .....	55
Tabela 21 – Distribuições estatísticas por processos.....	57
Tabela 22 – Cenários alvo de simulação .....	59
Tabela 23 – Necessidade de trabalho exigida pela Mini-Célula Pré-PVD .....	66
Tabela 24 – <i>Output</i> fornecido pelo FlexSim para cada um dos cenários, contemplando lavagens .....	69
Tabela 25 – <i>Output</i> fornecido pelo FlexSim para cada um dos cenários com tratamento de dados, não contemplando lavagens .....	70
Tabela 26 – <i>Output</i> fornecido pelo FlexSim para o cenário 6, rejeitando as lavagens.....	71
Tabela 27 – Proposta de investimento com base no FlexSim .....	71
Tabela 28 – Comparação dos <i>outputs</i> fornecidos pelos diferentes métodos de estudo .....	73

## Siglas

PVD – *Physical Vapor Deposition*

CrN – Nitreto de cromo

AN – Anel (*part number*)

HV – Dureza Vickers

ENR – Enrolamento de bobinas

NIG – Nitretação

LAV – Lavagem de segmentos

C21 – Célula 21

TFOR – Tratamento de forma

PRET – Preteçamento

OEU – *Overall Equipment Utilization*

OPA – Ordem de Produção de Anel

PMS – Máquina de Potting

DSM/P – Desmagnetizador

LXS – Máquina de lixar

CSG – Máquina de corte

ESC – Máquina de escovamento externo

IP – Informação de Produção

MTP – Método de Trabalho Padronizado

QDAS – *Quality Data Analysis System*





# 1. Introdução

Este trabalho surgiu de uma parceria entre a Universidade de Aveiro e a empresa MALHE – Componentes de Motores, S.A., localizada em Murte, Portugal, no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia e Gestão Industrial, com o propósito do desenvolvimento de um projeto na área de Métodos e Tempos do Departamento de Engenharia.

O Departamento de Engenharia, onde foi desenvolvido o trabalho descrito no presente relatório, tem como principais funções o desenvolvimento e acompanhamento de projetos relacionados com o produto e o processo e tem como finalidade dar apoio à produção para que sejam atingidos todos os objetivos de melhoria contínua propostos cada ano.

## 1.1 Objetivos do projeto

Com este projeto, pretendeu-se fazer um estudo de uma célula de produção da sub-linha do anel de 3 peças, mais concretamente, da Célula 21, que é uma área de trabalho composta por 7 máquinas operadas por um operador a cada turno. Além de controlar as máquinas, o operador deve registar as dimensões da folga de uma amostra de 5 segmentos a cada bobina de matéria-prima processada. Essas bobinas são encamisadas para fins de maquinação, primeiramente através de uma camisa e de seguida sendo colocadas numa árvore, as quais apresentam pesos de 7,2 kg e 5,8 kg, respetivamente, sendo que o peso deste ferramental pode variar consoante o *part number* do anel. Neste posto, o material a ser maquinado vem em forma de bobina, sendo esta uma fita metálica enrolada. A bobina apresenta um comprimento de  $200 \pm 1 \text{ mm}$ , espessura entre 0,36 a 0,40 mm e diâmetro variável, sendo que, após a passagem em todas as estações da Célula 21, origina um *output* de aproximadamente 500 segmentos.

O principal objetivo deste projeto é a implementação, na célula analisada, de um método de trabalho simples e eficaz, reduzindo assim o número de deslocações com carga por parte do operador, evitando, a médio/longo prazo, lesões por parte do mesmo, e ainda, paralelamente, aumentar a capacidade produtiva da Célula 21 para fazer face ao aumento da procura previsto para os próximos 5 anos (2018-2023) como será mostrado mais à frente.

Outro objetivo do trabalho, passa por implementar na MAHLE um método de simulação de processos através de um *software* informático de forma a que, no futuro, esta ferramenta possa ser aplicada a outras áreas da empresa.

Adicionalmente, ao longo deste projeto foram realizadas outras tarefas consideradas necessárias para melhorar e contribuir para o bom funcionamento da linha de produção.

## 1.2 Enquadramento

A MAHLE foi fundada por dois irmãos, Ernest and Hermann MAHLE, no ano de 1920 e é, atualmente, considerada um dos principais fornecedores mundiais de componentes para motores de veículos ligeiros e pesados. O Grupo MAHLE é constituído por 170 empresas distribuídas por 34 países, as quais empregam um total de 78.000 colaboradores, tendo iniciado a sua atividade com a produção de pistões de liga leve.

A fábrica de Murteide integrou o grupo Mahle em 1997, após a sua aquisição ao grupo brasileiro Cofap. Esta dedica-se à produção de segmentos de pistão (anéis) para motores alternativos de combustão para veículos de série, tendo ainda um departamento *Racing* onde desenvolvem segmentos para competição. De notar que são produzidos segmentos tanto para veículos ligeiros como para veículos pesados e motociclos.

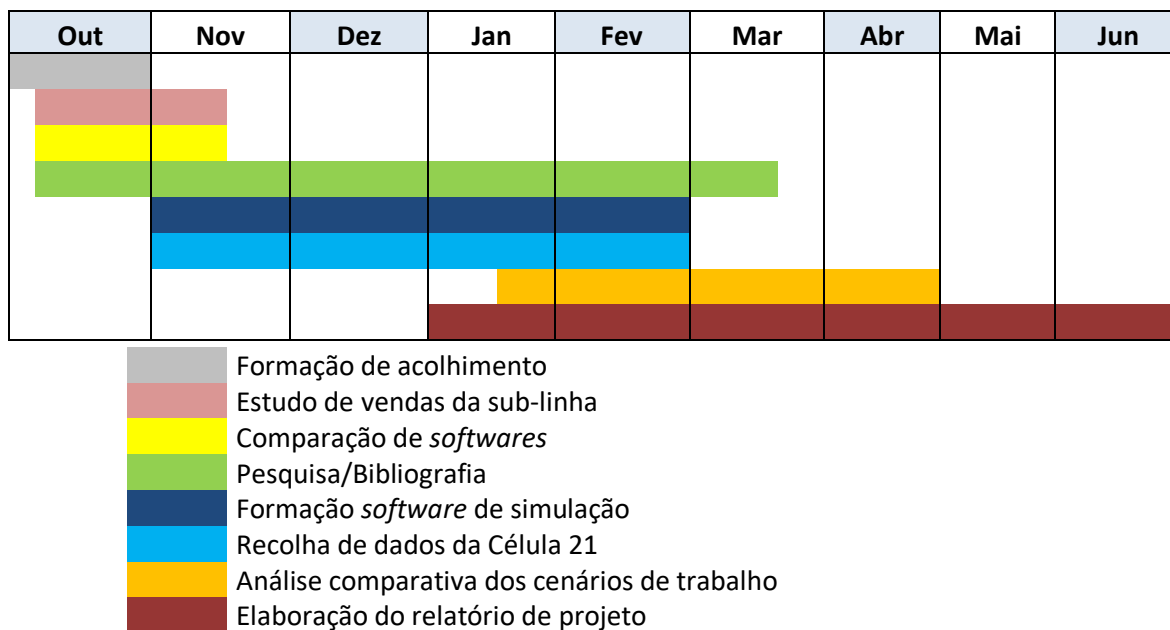
Relativamente aos produtos fabricados pela empresa, a MAHLE oferece uma vasta gama, desde os segmentos de compressão aos de óleo, em ferro fundido ou aço. De momento, os recursos da empresa permitem a produção destas peças com revestimentos de crómio, crómio cerâmico ou ligas de última geração aplicadas por PVD (*Physical Vapor Deposition*). É também disponibilizado o processo de nitretação que é aplicado em diversos tipos de segmentos.

O mercado da MAHLE inclui os produtores de equipamentos originais e assim como o setor da reposição. Para além destes setores que representam a maior parte do mercado da empresa, são desenvolvidas pequenas séries para competição.

### 1.3 Estrutura do projeto

Este projeto começou a ser realizado logo após a organização de um cronograma detalhado, de acordo com o início de cada tarefa, como é visível na Tabela 1.

**Tabela 1 - Cronograma da calendarização do projeto**





## 2. Enquadramento do trabalho

Ao longo deste capítulo serão abordados todos os aspetos teóricos e conceptuais relacionados com o tema deste projeto.

Antes de passar à introdução do que é um segmento de pistão, seria importante ter uma noção base do que é um motor alternativo de combustão interna.

### 2.1 Motor alternativo de combustão interna

Os motores de combustão interna são aqueles que transformam energia térmica, proveniente da queima de combustível, em energia mecânica, sendo que a explosão de combustível junto com a mistura de ar na câmara de combustão faz com que os pistões se desloquem alternadamente na direção da cambota (Figura 1).

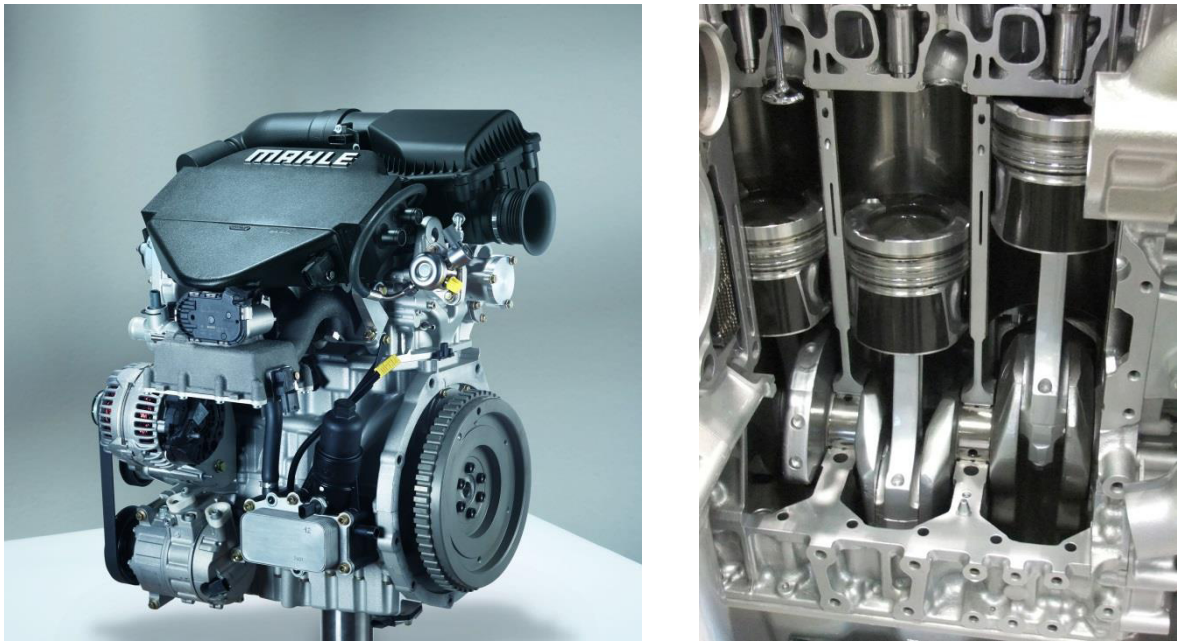


Figura 1 – Motor alternativo de combustão interna

Para este tipo de motores há dois tipos em que a MAHLE-Murtede é especialista: motores de ciclo *Otto* e motores de ciclo *Diesel*. Relativamente ao motor de ciclo *Otto*, é o motor de combustão interna no qual a mistura de gasolina e ar se inflama através de uma centelha elétrica, provocando a queima da mistura e a expansão dos gases. Por outro lado, nos motores de ciclo *Diesel*, somente o ar é comprimido, sendo o combustível injetado no interior do cilindro quando a compressão do ar está próxima do seu ponto máximo. A elevação de temperatura e pressão no interior do cilindro inflama o gasóleo (*Diesel*) na câmara de combustão (Murillo Illanes, 2010).

### 2.1.1 Produto – Segmentos de pistão



Figura 2 – Vista seccionada de um pistão e respetivos segmentos

À medida que a temperatura, as pressões e as velocidades de rotação continuam a subir, os segmentos de pistão são submetidos a cargas cada vez maiores. Os produtos que apresentam menor desgaste e fricção, melhor vedação e maior resistência à quebra apresentam elevada procura e, para isso, a MAHLE tem as soluções ideais.

A linha de produtos da MAHLE oferece segmentos (Figura 2) ou pacotes de segmentos para todos os motores. A ampla gama de produtos inclui anéis de compressão, anéis raspadores e anéis de controle de óleo em vários projetos, perfis e tecnologias.

Os segmentos de pistão são parte fundamental para o correto funcionamento de um motor alternativo de combustão interna, isto porque os segmentos desempenham diversas ações, no entanto, o papel principal passa por vedar a câmara de combustão e o cárter do motor do óleo lubrificante e dos resíduos não desejados, graças às suas propriedades elásticas de elevada força de expansão. Em adição, os segmentos compensam a folga entre o pistão e o cilindro, dando a vedação necessária para uma boa compressão do motor e um melhor rendimento térmico.

Os anéis de pistão da MAHLE estão prontos para atender a todos os requisitos: eles reduzem o desgaste do lado do anel, contribuem para o ajuste ideal do cilindro, reduzem o consumo de óleo e reduzem o atrito (Lourenço, 2015).

De uma forma geral, os pistões são compostos por 3 canaletas (ranhuras horizontais presentes no pistão) para colocação de segmentos, visíveis na Figura 3:

- 1ª canaleta – Anel de compressão;
- 2ª canaleta – Anel raspador;
- 3ª canaleta – Anel de óleo.

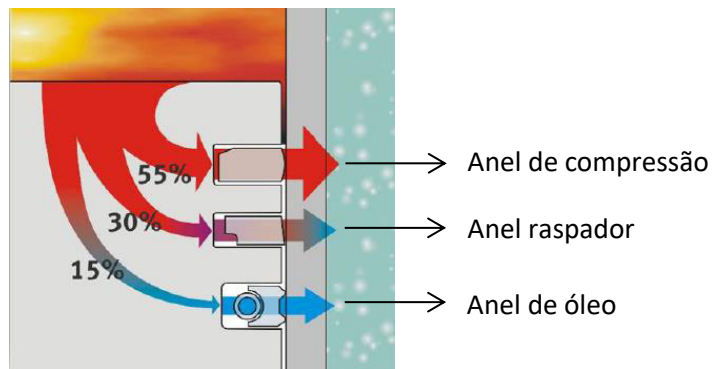


Figura 3 – Ilustração dos três tipos de segmentos produzidos

Contudo, para aplicações do setor Motorsport é possível encontrar pistões com apenas duas canaletas, de forma a reduzir ainda mais o atrito entre o pistão e as paredes do cilindro. Nestes casos o anel raspador mostra não ser essencial devido à baixa necessidade de prolongar a vida útil do motor.

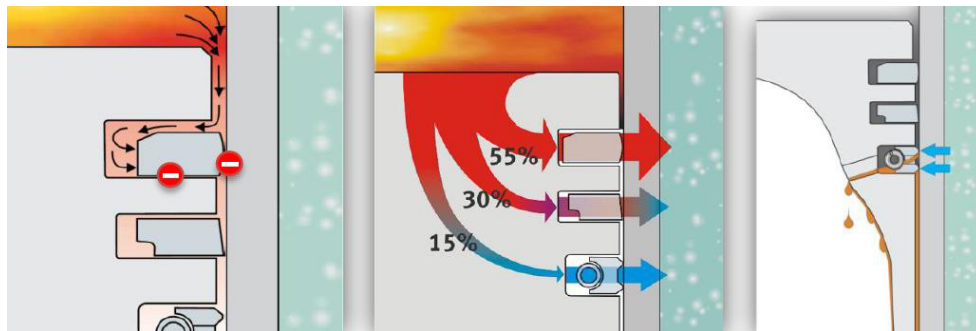


Figura 4 – Funcionamento dos segmentos

A função dos segmentos pode ser observada na Figura 4:

- 1ª) Vedação da câmara de combustão;
- 2ª) Transmissão de calor;
- 3ª) Controlo de óleo.

As anomalias nos motores provocadas pelos segmentos, assim como as causas de cada uma, são as seguintes (Murillo Illanes, 2010):

- Perda de compressão - pode ser causada por segmentos gastos, presos ou quebrados e camisas ou cilindros nas mesmas condições, levando assim a um consumo de combustível acima do normal.
- Ruídos no motor - folga e/ou desgaste excessivo entre o pistão e o cilindro.

Os anéis de óleo são aqueles que fazem o controlo do óleo lubrificante. Para que esta aplicação seja feita de forma satisfatória, estes apresentam uma secção reduzida e materiais com

menor módulo de elasticidade, para que ocorra uma boa conformabilidade e adaptação à camisa do cilindro.

Estes podem ser constituídos por 2 peças, mais conhecidos internamente por “I-Shaped” ou três peças, tal como se observa nas figuras seguintes.

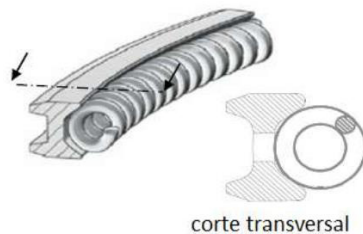


Figura 5 – Anel I-Shaped

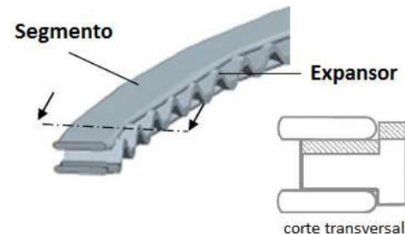


Figura 6 – Anel 3 peças

Para o segmento de 2 peças (Figura 5), o elemento interno, uma mola helicoidal cilíndrica, feita em aço de liga com elevada estabilidade térmica de modo a assegurar menor perda de força tangencial ao longo da vida do anel, vai ampliar a pressão radial exercida pelo corpo externo e atua num canal existente na face interna do anel (Lourenço, 2015).

Já o segmento de 3 peças (Figura 6) é um anel composto por 3 peças dimensionadas para serem montadas numa única canaleta. Possui dois segmentos em aço, normalmente revestidos, e um expansor / espaçador flexível de aço de alta resistência que serve para separar segmentos e forçá-los contra as paredes do cilindro e contra as laterais da canaleta do pistão. Este tipo de anel é utilizado unicamente em motores a gasolina, devido à maior tendência dos motores a diesel para a formação de depósitos de carvão que por si só irá obstruir as passagens de óleo (Lourenço, 2015).

### 2.1.2 Coberturas ou Revestimentos

A resistência ao desgaste dos anéis pode ser melhorada, através do revestimento da sua face de contacto com materiais de elevada dureza e elevada temperatura de fusão. Os tipos de revestimentos utilizados nos anéis MAHLE são os seguintes (Lourenço, 2015):

**Camada de Cromo** - Uma camada de cromo electrodepositada na superfície de trabalho do anel confere-lhe uma excelente resistência ao desgaste abrasivo, bem como uma boa resistência ao desgaste adesivo. A cromação da face de contacto dos anéis prolonga a sua vida e reduz o desgaste do cilindro. As faces de contacto dos anéis de óleo normalmente são cromadas, por causa das elevadas pressões unitárias a que estão sujeitas.

**Camada nitretada** - A nitretação gasosa é um processo termo-químico de endurecimento superficial no qual ocorre a difusão de átomos de azoto (nitrogénio) no reticulado cristalino do metal base, provocando a sua distorção. Assim consegue-se estabelecer uma camada superficial com propriedades intermediárias entre os materiais metálicos e cerâmicos, com baixo coeficiente de atrito e alta resistência ao engripamento e ao desgaste. A nitretação gasosa é aplicada aos anéis



de pistão feitos em aço, inicialmente utilizados nos motores a gasolina, mas posteriormente a sua utilização também se estendeu aos motores diesel.

**Camada PVD – Deposição física em fase vapor** - A deposição por arco catódico é uma técnica de PVD que utiliza a vaporização e ionização de um metal através de um arco catódico. Os iões metálicos são então guiados por um campo magnético, acelerados e projetados sobre a peça a revestir. Este processo possibilita a deposição de uma grande variedade de materiais e permite a formação de revestimentos de elevada densidade e espessura reduzida. Graças à sua elevada resistência ao desgaste, tanto abrasivo como adesivo, consequência da sua elevada dureza e temperatura de fusão, o nitreto de cromo, CrN, é uma das camadas mais utilizadas no revestimento de anéis de pistão. A Figura 7, mostra a máquina em que este processo é realizado, assim como o seu ferramental.



Figura 7 – Máquina PVD – câmara de revestimento

## 2.2 Fluxograma do processo de fabrico (3 peças)

Neste tópico aborda-se o fluxograma do processo de fabrico macro, observado na Figura 8, relativo aos segmentos de 3 peças Nitretados com PVD, dado que esta é a última tecnologia associada aos segmentos de óleo.

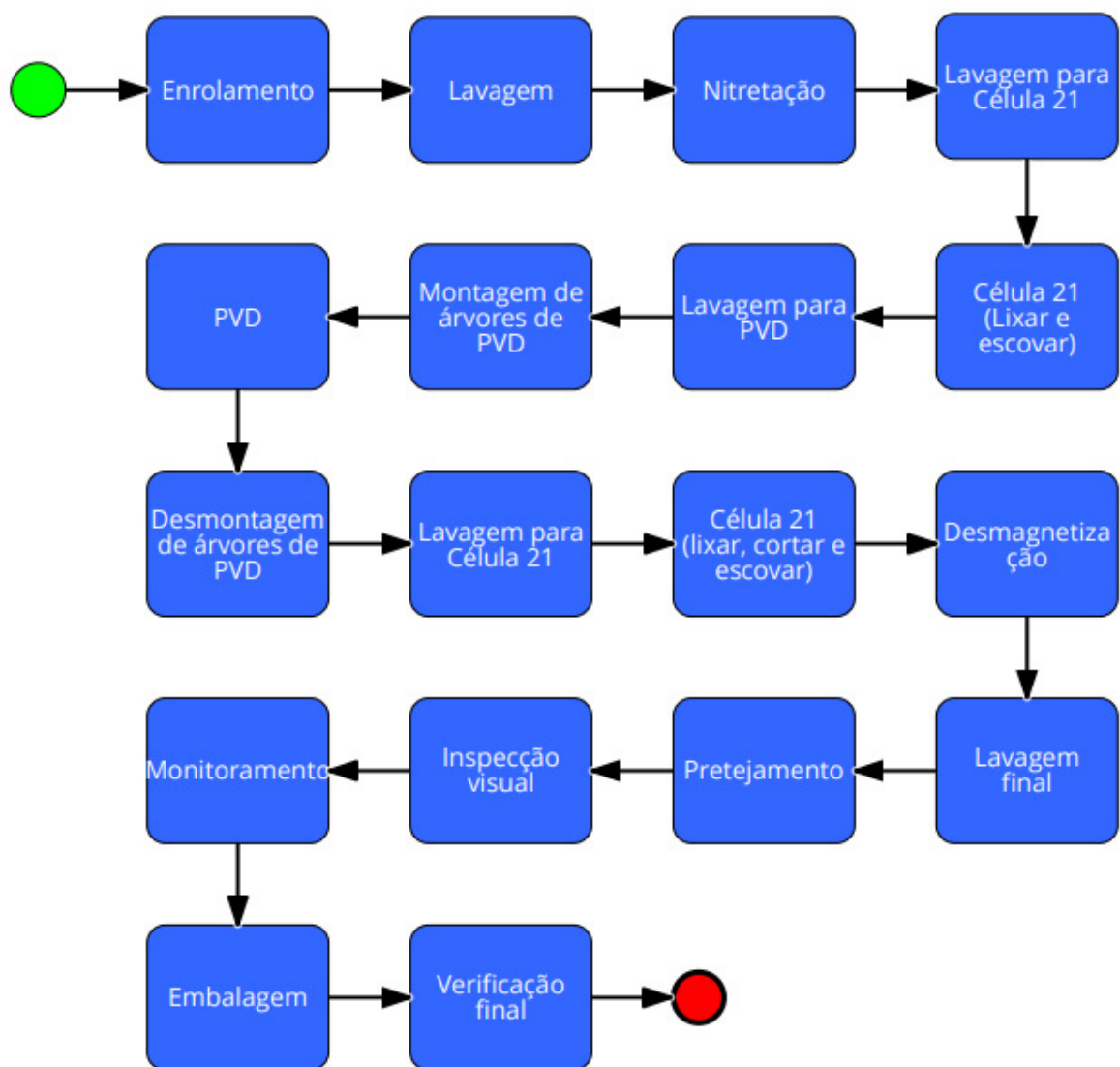


Figura 8 – Fluxograma do macro processo de um segmento Nitretado com PVD na Sub-Linha do “3 peças”

Este tipo de segmentos apresenta maior complexidade produtiva, uma vez que obriga os anéis a passar duas vezes na Célula 21, obrigando assim este posto de trabalho a parar a máquina de corte (CSG-01) (Figura 9).

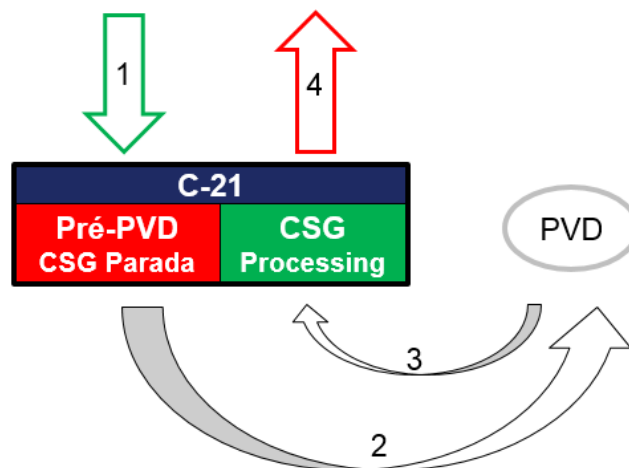


Figura 9 – Ilustração da complexidade produtiva relativa à Célula 21 nos anéis com PVD

Esse cenário de produção pode ser observado na Figura 10.

### 2.3 Célula 21

Considerando o processo da Célula 21, após a operação de revestimento de PVD, pode ser observado o fluxograma do processo micro na figura seguinte:

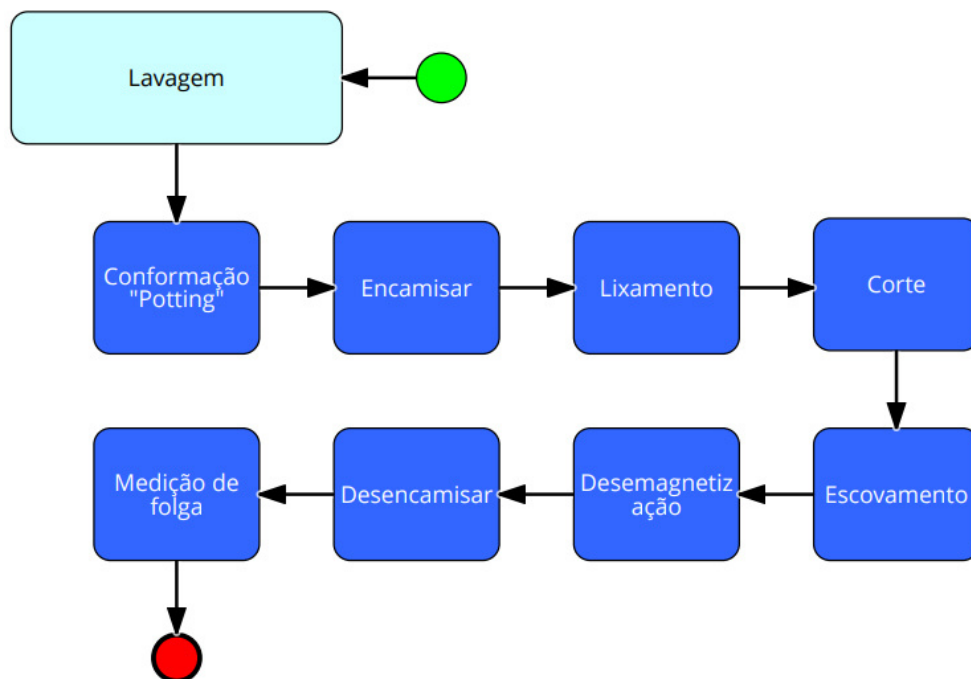


Figura 10 – Micro processo relativo à Célula 21

Este processo é constituído por um total de 9 tarefas, contudo o operador deste posto de trabalho tem a seu cargo outras tarefas que são executadas com menor frequência.

## 2.4 Simulação

Segundo Banks (2005), a simulação é a imitação da operação de um processo ou sistema do mundo real ao longo do tempo. A simulação envolve a geração de uma história artificial do sistema e a observação dessa história para extrair dados sobre as características operacionais do sistema real que é representado. A simulação é uma metodologia indispensável de resolução de problemas sendo usada para descrever e analisar o comportamento de um sistema, questionar "e se" sobre o sistema real e auxiliar no projeto de sistemas reais.

De acordo com Banks (2005), as simulações de eventos discretos são definidas como aquelas em que as variáveis de estado mudam apenas nos pontos discretos no tempo em que os eventos ocorrem:

*“Conceitos de modelação foram definidos para que um modelo de simulação de eventos discretos possa ser definido como aquele em que as variáveis de estado mudam apenas nos pontos discretos no tempo em que os eventos ocorrem. Estes eventos ocorrem como consequência de tempos de atividade e atrasos. Entidades podem competir por recursos do sistema, possivelmente unindo filas enquanto esperam por um recurso disponível. A atividade e os tempos de atraso podem "manter" entidades por períodos de tempo.”*

Antes de iniciar um estudo de simulação há algo que se deve ter em conta: “Será que o sistema em estudo é indicado para fazer um estudo de simulação?”.

### 2.4.1 Cenários para utilização de modelos de simulação

De acordo com Ramos (2005), os modelos de simulação devem ser utilizados para os casos seguintes:

- Quando a elevada complexidade de um sistema inviabiliza a utilização de técnicas analíticas.
- Quando pretendemos estudar o impacto de determinadas alterações (organizacionais, ambientais...).
- Quando queremos identificar fatores chave que afetam o desempenho dos sistemas.
- Quando pretendemos ilustrar modelos analíticos.
- Quando queremos determinar capacidades operacionais.
- Quando queremos testar determinados procedimentos.
- Quando pretendemos visualizar o desempenho do sistema (utilização de animações).

### 2.4.2 Ocasões em que a simulação não deve ser utilizada

O tema “Simulação” desperta muitas vezes bastante curiosidade por parte dos trabalhadores, no entanto há diversas ocasiões em que a viabilidade destes estudos não é de todo positiva e, por esse motivo não devem ser utilizados. Essas ocasiões são (Ramos, 2005):

- Quando o problema em análise é muito simples.
- Quando pode ser encontrada uma solução analítica.
- Quando a experimentação direta é fiável e pouco dispendiosa.
- Quando os custos excederem os retornos esperados.
- Quando não existe disponibilidade de dados.
- Quando o tempo para desenvolvimento dos modelos é insuficiente.

A Simulação pode, assim, apresentar vantagens e desvantagens como ferramenta de estudo de um projeto.

### 2.4.3 Vantagens da simulação

As vantagens da simulação de acordo com Sharma (2015) são:

- Permite o estudo de experimentações de sistemas complexos.
- Permite a realização de teste de fiabilidade de qualquer hipótese de como ou porque é que certos fenómenos ocorrem.
- Flexibilidade no tempo de análise, uma vez que pode ser comprimido ou expandido para permitir aumentar ou diminuir o tempo de ação do modelo em estudo.
- O desenho de um modelo de simulação ajuda a adquirir conhecimentos que podem conduzir à melhoria do sistema.
- Avalia as diferentes circunstâncias da simulação através de *inputs* e a partir da observação dos resultados de *output* podem ser retiradas importantes conclusões do modelo.
- Novos desenhos de hardware, *layouts* físicos, sistemas de transporte, etc, podem ser testados sem recorrer ao investimento nestes mesmo meios.
- A simulação ajuda na formulação e verificação de soluções analíticas.

### 2.4.4 Desvantagens da simulação

Ainda assim, as desvantagens da simulação de acordo com Sharma (2015) são:

- É necessária formação adequada para construir modelos de simulação. Muitas vezes, a tentativa de obter ganhos através da simulação torna-se fútil devido a modelos ambíguos.
- Uma vez que a aleatoriedade é associada com a simulação (*inputs* aleatórios), torna-se difícil distinguir quando uma observação é resultado de um sistema de inter-relações ou de aleatoriedade.
- Simulação de modelos e sua análise podem ser grandes consumidores de tempo e dinheiro.

#### 2.4.5 Passos para realização de uma simulação

Para realizar um estudo de simulação correto é necessário obedecer a um conjunto de passos que facilitam tanto a construção do modelo como a posterior análise dos *outputs*. Segundo Law & Kelton (1991), esses passos baseiam-se no fluxograma da Figura 11:

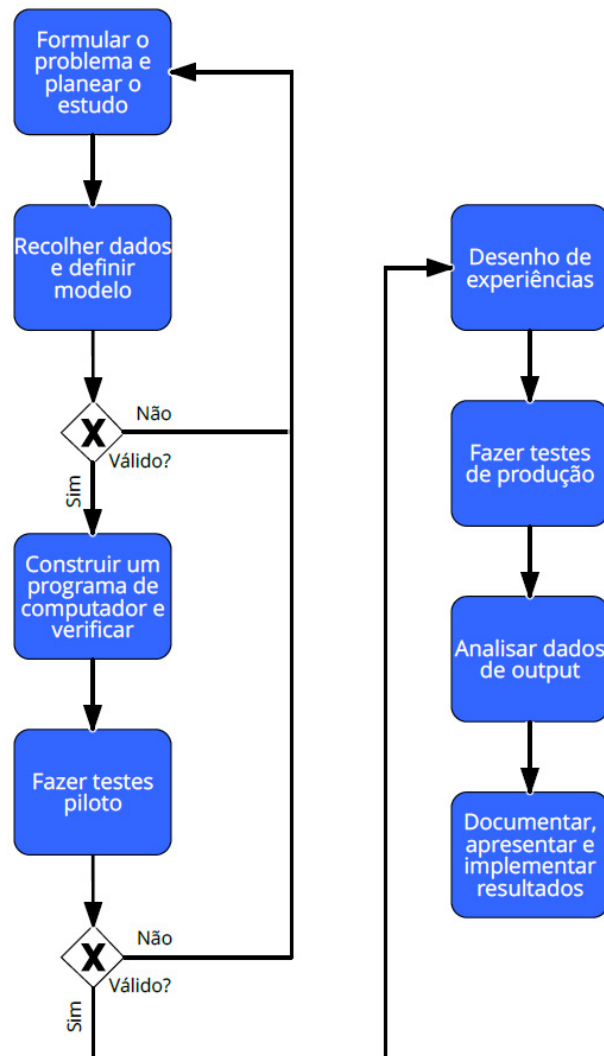


Figura 11 – Passos de um estudo de simulação de processos

- 1- O primeiro passo passa por formular o problema e planejar o estudo. Se este passo não for realizado de forma correta, a probabilidade de obter um estudo bem sucedido é bastante baixa pois irá afetar toda a cadeia lógica do modelo. De uma forma geral este estudo deve ser planeado em termos de recursos, custo e tempo necessário para cada passo do projeto.
- 2- No segundo passo, deve ser realizada uma recolha de dados e para posteriormente se definir o modelo. Esta informação deve ser recolhida no “chão de fábrica” e usada para definir os processos a usar no modelo de simulação, assim como distribuições de probabilidades para as variáveis aleatórias.

Após a recolha de dados deve ser feita uma verificação do modelo para avaliar o seu correto funcionamento, no entanto se possível, esta validação deve ser feita ao longo de todo o processo de modelação. Ao longo de toda a modelação é imperativo envolver outros intervenientes que estejam familiarizados com o processo para que possam dar também a sua opinião acerca do que pode ser melhorado ou alterado.

Caso a definição do modelo não seja validada, o estudo deve começar do zero de forma a que haja um melhor planeamento e recolha de dados.

Caso seja validado, o estudo deve prosseguir, desta forma para o passo 3.

- 3- Aqui é construído o modelo no *software* de simulação, iniciando com a escolha da linguagem do programa de modelação.
- 4- O passo quatro passa por realizar testes piloto que são executados para ajudar na validação do modelo.

Nesta fase do estudo, é feita a última validação do modelo com base nos testes piloto. Aqui é testada a sensibilidade dos *outputs* do modelo aquando da alteração dos *inputs*. Caso não haja uma validação do modelo, este deverá ser alvo de alguns ajustes, voltando ao passo 3. No entanto, espera-se que este ajuste seja, de certa forma, pouco extensivo.

Uma vez validado, é altura de avançar para o passo cinco.

- 5- Realização de desenho de experiências, ou seja, caso existam outros cenários que sejam possíveis ou sejam vistos como melhorias de processo, estes deverão ser também construídos, tendo como base o processo inicial (se for o caso).
- 6- Neste passo fazem-se testes de produção com o intuito de obter dados do desempenho de cada um dos cenários definidos aquando do desenho de experiências.
- 7- Após obter os dados de *output* necessários, é realizada uma comparação entre cada um dos cenários. O principal objetivo da análise dos intervalos de confiança utilizados para medir o desempenho de cada um dos desenhos é auxiliar na decisão de qual o sistema simulado é melhor em relação a alguma medida específica de desempenho.
- 8- Por fim, o último passo serve para documentar, apresentar e implementar resultados. Este deve ser sempre realizado pois os modelos de simulação são utilizados em diversas aplicações, por isso é que devem ser registadas todas as premissas aplicadas a este modelo.

#### 2.4.6 O caminho para o sucesso da simulação

Para se atingir o sucesso é necessário que sejam considerados diversos fatores que são cruciais na passagem de um estudo de simulação para o chão de fábrica, isto porque sem eles todo o estudo realizado passa a ter valor nulo pois, após um elevado número de horas e possivelmente

de recursos humanos, que são traduzidos em custo para uma empresa, todo o trabalho realizado acaba por não ser aplicado.

Esse caminho do sucesso é relatado da seguinte forma (Robert, 1998):

- Ter objetivos bem definidos e possíveis de realizar;
- Ter a certeza de que há recursos disponíveis para completar com sucesso o projeto a tempo;
- Ter apoio de superiores e praticar uma boa comunicação com aqueles que fornecem informação e dados;
- Assegurar que todos têm os conhecimentos necessários para completar o projeto a tempo;
- Assegurar que existe uma comunicação adequada com os fornecedores e com o utilizador final;
- Ter documentação de todo o planeamento e todos os aspetos de modelação.

Para finalizar este tema, segundo Law & Kelton (1991):

*“(...) a simulation study whose results are never implemented is most likely a failure. Furthermore, results from highly credible models are much more likely to be used.”*

#### 2.4.7 Número de replicações

Para proceder à realização de um teste de simulação de forma correta, deve-se ter em conta alguns aspetos estatísticos que mais tarde ajudarão na interpretação dos resultados obtidos pelo simulador.

De uma forma geral, os *outputs* dos estudos de simulação são apresentados em termos de intervalos de valores possíveis. Por exemplo, pode ser observado que uma certa célula de produção produz  $5000 \pm 200$  peças por dia, com 95% de confiança. Assim, através desta informação é possível afirmar que 95% das vezes esta célula produzirá entre 4800 e 5200 peças. A este intervalo dá-se o nome de Intervalo de Confiança (IC), sendo que pode variar devido a dois fatores: a variabilidade natural do processo e o número de observações (replicações) utilizadas no cálculo. Caso se deseje obter um resultado da capacidade real mais preciso o intervalo poderá passar a ser  $\pm 100$  peças por dia. No entanto, o único fator que pode ser alterado caso se pretenda refinar o *output* é o número de replicações. Ou seja, quanto maior o número de replicações mais preciso é o IC, para um dado nível de confiança (FlexSim, acedido em 14/03/2019).



Na Figura 12, observa-se o método de funcionamento:



Figura 12 – Método de funcionamento para determinar o número de replicações suficientes

A partir do tutorial para o cálculo de replicações necessárias fornecido pelo FlexSim (acedido em 14/03/2019), sabe-se que a fórmula que é derivada da definição de IC é a seguinte:

$$n \geq \left( \frac{t_{\alpha/2, n_0-1} S}{\varepsilon} \right)^2$$

Onde,

$n$ : número de replicações necessárias para atingir os valores desejados

$S$ : é o desvio padrão da amostra recolhida

$\varepsilon$ : é o valor de desvio que se deseja obter, isto é, a semi amplitude do IC

$t_{\alpha/2, n_0-1}$ : é o valor de referência da distribuição T-Student para o nível de significância  $\alpha/2$  que se deseja obter (ver Anexo A). Os dados de entrada para consulta deste valor são o número de observações recolhidas e o nível de confiança que se deseja obter.

O objetivo desta fórmula passa por obter o número mínimo de replicações necessárias para garantir que o IC de confiança seja do tamanho estipulado.

## 2.5 Recolha e preparação de dados

Um sistema de simulação deve passar por uma fase de recolha e preparação de dados, sendo que estes podem ser divididos em dois grupos:

- Modelização estrutural – que é a representação lógica de um dado método de produção na qual se definem as entidades, recursos, percursos de entidades, etc.
- Modelização quantitativa – que é a representação numérica de tempos de entrega, tempos de processamento, planos de capacidade, etc.

Para se obter estes dados, deve ser realizada uma observação intensiva do método operativo do sistema, de seguida passa-se à recolha dos dados, seguido de uma análise correta com o intuito de converter esses dados em *inputs* realísticos do modelo.

### 2.5.1 Fontes de aleatoriedade

Como em quase todos os modelos de simulação discreta há diversas fontes de aleatoriedade com características probabilísticas. No caso da indústria, temos como fontes: os tempos de processamento, tempos de reparação de máquinas, tempos de *setup*, tempos de intervalo, etc.

### 2.5.2 Identificação da distribuição de dados

As distribuições de dados são originadas a partir do momento que se define um valor estimado. Na verdade, ao especificar distribuições teóricas com valor plausíveis realiza-se uma preparação de *inputs*, de acordo com Fishman & Jaramillo (2001).

Para encontrar a distribuição que melhor se ajusta aos dados é necessário analisar algumas distribuições mais comuns na simulação, descritas por Banks (2005):

- **Binomial:** Modela “n” jogadas sucessivas independentes, com probabilidade de sucesso “p”.
- **Binomial negativa:** Modela o número de jogadas até obter “k” sucessos.
- **Poisson:** Modela o número de eventos independentes que ocorrem em um período fixo.
- **Normal:** Modela um processo como a soma de processos menores. Admite valor negativo.
- **Exponencial:** Modela tempo entre eventos independentes ou tempo de processo sem memória.
- **Uniforme:** Modela incerteza completa. Todas as saídas são igualmente prováveis.
- **Triangular:** Modela um processo onde apenas o mínimo, mais provável e máximo são conhecidos.
- **Gamma:** Distribuição flexível usada para modelar variáveis aleatórias não negativas.
- **Lognormal:** Baseada no modelo de crescimento multiplicativo, o que significa que a qualquer momento, o processo é submetido a um aumento da degradação aleatória, que é proporcional ao seu estado atual.

### 3. Softwares de simulação

Na vasta oferta que existe de *softwares* de simulação, foram escolhidos para análise apenas dois: o Arena e o FlexSim, sendo que ambos têm como um dos principais objetivos o apoio à decisão na gestão de sistemas de filas de espera, particularmente processos de produção. São poucas as decisões de negócios que são simples pois as mudanças numa área do negócio afetam outras áreas, geralmente de forma não antecipada. Neste contexto, um *software* de simulação de processos é uma maneira eficaz de avaliar todas as implicações das decisões de negócios antes que elas sejam colocadas em prática (Sakurada & Miyake, 2010).

#### 3.1 Arena software

Este *software* foi desenvolvido pela *Rockwell Automation*, em 1983. Nos dias de hoje, este *software* já se encontra na versão 16.0.

Segundo ARENA (2004), o Arena é projetado para analisar o impacto das mudanças envolvendo redesigns significativos e complexos associados à produção, processos, logística, distribuição e armazenamento, e sistemas de serviços. O *software* Arena oferece a máxima flexibilidade e amplitude de cobertura de aplicativos para modelar qualquer nível de detalhe e complexidade desejado.

#### 3.2 FlexSim

O FlexSim pode servir de suporte a engenheiros, gestores e decisores que pretendam validar, melhorar ou até mesmo aprender mais sobre os processos existentes ou novos processos que estejam a ser planejados.

É uma ferramenta de simulação que já se encontra na sua versão 19.1, foi desenvolvida com o intuito de facilitar a construção de modelos de simulação complexos, sem sacrificar a função ou apelo visual. Permite, assim, criar modelos gráficos e detalhados que mostram os resultados dos modelos, assim como a evolução dos indicadores de desempenho considerados relevantes.

Segundo FlexSim (2017), o FlexSim é uma poderosa ferramenta de análise que ajuda engenheiros a tomar decisões inteligentes no projeto e operação de um sistema. Com o FlexSim, é possível construir um modelo de computador tridimensional (3D) de um sistema real e, em seguida, estudar esse sistema durante um período de tempo mais curto e por um custo menor do que quando comparado com o sistema real. Funciona como uma ferramenta de análise "*what-if*", e fornece *feedback* quantitativo sobre várias soluções propostas para ajudar a encontrar rapidamente a solução ideal. Com a animação gráfica realista e extensos relatórios de desempenho do FlexSim, é possível identificar problemas e avaliar soluções alternativas num curto período de tempo. Usa-se o FlexSim para modelar um sistema antes que ele seja construído ou para testar as políticas operacionais antes que elas sejam realmente implementadas. Assim, evita muitas das armadilhas que são frequentemente encontradas na inicialização de um novo sistema.

### 3.3 Comparação de *softwares*

Para proceder à escolha do *software* de simulação indicado para este projeto, teve-se por base o estudo comparativo de *softwares* comerciais de simulação aplicados à produção feito por Mourtzis, Doukas, & Bernidaki (2014):

Tabela 2 – Comparação de características de desempenho de *softwares* de simulação

Grupos de critérios	Comparação de critérios	Softwares de simulação	
		Arena	FlexSim
Hardware e Software	Aspetos de programação	***	**
	Compatibilidade de <i>software</i>	**	***
	Suporte ao utilizador	**	****
	Aplicação	Geral	Geral
Aspetos gerais	Experiência necessária	****	**
	Facilidade de uso	**	**
	Ajuda <i>online</i>	**	****
Assistência na modelação	Biblioteca e <i>templates</i>	**	****
	Aspetos visuais	**	*****
	Eficiência	**	****
Capacidade de simulação	Testabilidade	***	****
	Instalações de experimentação	***	****
	Dados estatísticos	***	****
	Capacidades de <i>input/output</i>	***	****
Input/Output	Capacidades de produção	**	****
	Capacidades analíticas	***	****

Após a análise da Tabela 2 – Comparação de características de desempenho de *softwares* de simulação, foi concluído que o *software* de simulação que mais se adequava a este projeto era o FlexSim, pelos seguintes motivos:

- Melhor apoio ao utilizador, assim como um excelente serviço de ajuda *online*;
- Menor exigência no aspeto de experiência do utilizador;
- Excelente desempenho a nível visual (3D);
- Maior eficiência e capacidade de simulação quando comparado com o Arena.

De uma forma geral, o FlexSim mostra ser um *software* mais interessante e fácil de trabalhar do que o Arena, permitindo que, no fim do estudo, seja possível observar o método operativo em 3D, que de certa forma torna todo o projeto ainda mais interessante.

## 4. Caso / metodologia

Neste capítulo será apresentado o processo produtivo, referente à Sub-Linha “3 peças”, assim como, de uma forma mais detalhada, todo o processo subjacente à Célula 21. De seguida será explicada a implementação de um método de trabalho standardizado e, por fim, será apresentado um estudo analítico de *output* que serviu de base comparativa aos dados obtidos pelo FlexSim.

### 4.1 Processo produtivo

Existem dois tipos de segmentos nos quais este projeto se foca, segmentos esses que são os que apresentam volumes de produção mais significativos para a Sub-Linha do “anel 3 peças”, tendo por base a previsão de vendas até 2023. Esses segmentos são os Nitretados e os Nitretados com PVD. Na Tabela 13 observa-se de forma detalhada o método de trabalho da Célula 21, assim como a caracterização dos seus ANs (*Part Number*).

**Tabela 3 – Método de trabalho da Célula 21 e caracterização de ANs (2018)**

Sub-Linha	Segmentos + Espaçadores
Nr de Turnos	3
Horas de trabalho/dia	22,5
Tecnologia dos segmentos	Número de ANs
Cromado	4
Nitretado	7
Nitretado com PVD	3
Aço Carbono com PVD	3

O processo produtivo para o segmento Nitretado passa por diversas fases, nomeadamente:

1 – Enrolamento – A fita metálica é enrolada e cortada em forma de bobina com um comprimento de  $200 \pm 1 \text{ mm}$ .

2 – Lavagem – As peças são lavadas por forma a garantir a limpeza de impurezas antes de passarem ao próximo processo.

3 – Nitretação gasosa – Nesta fase é aplicada uma camada nitretada de 0,07 mm, que oferece uma dureza mínima de 700 HV (Dureza Vickers) na face de contacto. Após esta operação a bobina tem de ser oleada para garantir que não há oxidação.

4 – Lavagem – Nesta fase uma nova lavagem é realizada, para garantir que a bobina se encontra seca e sem vestígios de óleo. Para isso a bobina passa em duas máquinas de lavar com diferentes objetivos: uma primeira lavagem para retirar o óleo das bobinas e uma segunda lavagem por ação de um líquido passivante que prolonga o aparecimento de oxidação. Esta operação é, atualmente, realizada pelo operador da célula 21.

5 – Superacabamento, corte, escovamento externo e desmagnetização – Estas correspondem às fases do processo que são realizadas na Célula 21.

6 – Lavagem – É feita mais outra lavagem visto que os processos de lixamento, corte e escovagem envolvem óleos de lubrificação e, por isso, as peças têm que ser lavadas mais uma vez.

7 – Preparação das camisas – Processo em que se colocam os segmentos numa camisa para a operação seguinte.

8 – Tratamento de forma – Este tratamento é realizado num forno de alívio de tensões por ação de calor com o objetivo de eliminar as tensões provocadas pelo processo de enrolamento.

9 – Desmontar camisas – Processo posterior ao tratamento de forma que consiste em retirar os segmentos das camisas para serem colocados em varas.

10 – Pretejamento – Este processo dá um aspeto visual mais atrativo ao segmento, no entanto não acrescenta qualquer propriedade mecânica ao mesmo, sendo unicamente uma imagem da Mahle.

Após o pretejamento, o segmento encontra-se acabado, no entanto precisa de passar por 4 processos ao nível da Qualidade:

11 – Inspeção visual – Onde é feito o controlo de qualidade relativo aos defeitos visuais.

12 – Monitoramento – Este processo é designado como plano de controlo porque é nesta fase que são realizados todos os testes de qualidade dos segmentos. Esses testes são:

- o calibre de luz, que controla a qualidade referente à passagem de luz entre o segmento e a camisa. Este processo é essencial para garantir a eficiência do mesmo, isto porque, caso a passagem de luz seja superior ao estipulado, a passagem de gases / óleo entre o segmento e a camisa poderá ocorrer, originando um mau funcionamento do mesmo;
- o teste de folga, que controla as folgas das extremidades dos segmentos. Caso a folga seja pequena de mais, este pode “bater pontas” e acabar por quebrar, levando à gripagem do motor ou, caso seja grande demais, a passagem de óleo e gases será possível, o que não é aconselhável;
- a espessura radial, para garantir que a espessura está dentro dos parâmetros estipulados pelo cliente.

13 – Embalagem – Processo de embalagem dos segmentos referentes a cada encomenda, onde é colocado um rótulo na embalagem que dá a informação referente ao segmento.

14 – Verificação final – Processo final que foi introduzido recentemente para garantir que a informação descrita no rótulo está conforme o produto embalado.

Contudo, os segmentos Nitretados com PVD (*Physical Vapor Deposition*) têm uma complexidade produtiva mais elevada, pois sofrem uma primeira passagem pela Célula 21 para

fazer as operações de lixamento e escovamento de forma a garantir o diâmetro externo da bobina, indo de seguida fazer o processo de PVD onde é aplicada uma camada de MIP230 com uma espessura que varia dos 0,014 a 0,020 mm. Esta camada oferece uma dureza entre 1200 e 1600 HV. Após o PVD, as bobinas voltam à Célula 21, desta vez para fazer o processo completo (Figura 8). Devido a este aumento de complexidade, a frequência de lavagem das bobinas também aumenta, de 3 vezes, para anéis nitretados, para 5 vezes, para anéis nitretados com PVD.

#### 4.2 Célula 21 - Gargalo da Sub-Linha “Anel 3 peças”

A Célula 21 apresentava-se como o processo gargalo de toda a linha estando a trabalhar a 100% da sua capacidade. Entende-se como processo gargalo, aquela área de produção que apresenta uma capacidade produtiva inferior às restantes de uma mesma linha de produção. Esta situação pode ser observada na Tabela 4:

**Tabela 4 – Capacidade produtiva da Sub-Linha “Anel 3 peças”, referente aos processos de menor produtividade**

Operação	Descrição IUA	Máquina	Segmentos por ciclo	Produtividade 80% [pcs por hora]	Time 1000pcs [min]
ENR	Enrolamento de Bobinas	ENS-01	427	4534	10,59
NIG	Nitretação	FOR-18	47000	4423	10,85
LAV	Lavar Segmentos	LAV-42	1281	7764	6,18
LAV	Lavar Segmentos	LAV-35	1281	5069	9,47
C21	C21 - Corte	CSG-01	500	4800	10,00
LAV	Lavar Segmentos	LAV-31	1281	7764	6,18

Tal como observado, verifica-se que há 3 áreas com uma capacidade produtiva inferior (valores assinalados a vermelho). Esses processos são: o enrolamento de bobinas (ENR), a nitretação (NIG) e a Célula 21 (C21), respetivamente do menor para o maior valor de produtividade. No entanto, a MAHLE, tem recursos suficientes noutras sub-linhas de produção, no que diz respeito à operação de Nitretação (NIT), para fazer face ao aumento da procura. Resta então, a operação ENR e C21.

Uma vez que a enroladora apresenta um OEU (*Overall Equipment Utilization*) de 65% (10% mais elevado que a C21 em 2018), uma complexidade produtiva muito menor (uma máquina para um operador) e porque, em termos ergonómicos, a Célula 21 mostra ter uma margem para melhorias muito superior, foi decidido iniciar um estudo de capacidade / melhoria para a Célula 21. Relativamente à enroladora, esta apresenta um OEU de 65%, contudo este pode ser aumentado de forma mais simples. Ainda assim, no futuro, será necessário investir numa segunda máquina ENR para balancear a produção.

Relativamente à produtividade de 80%, este é um factor de segurança utilizado pelo Grupo MAHLE que representa o OEU médio obrigatório estipulado pela empresa. Este tem ainda o

objetivo de auxiliar nos casos de estudos de capacidade pois contabiliza 20% (valor padrão) do tempo desperdiçado na produção.

#### 4.2.1 Layout da Célula 21

O layout observado em Outubro de 2018 da Célula 21 é ilustrado na **Error! Reference source not found. 13** :

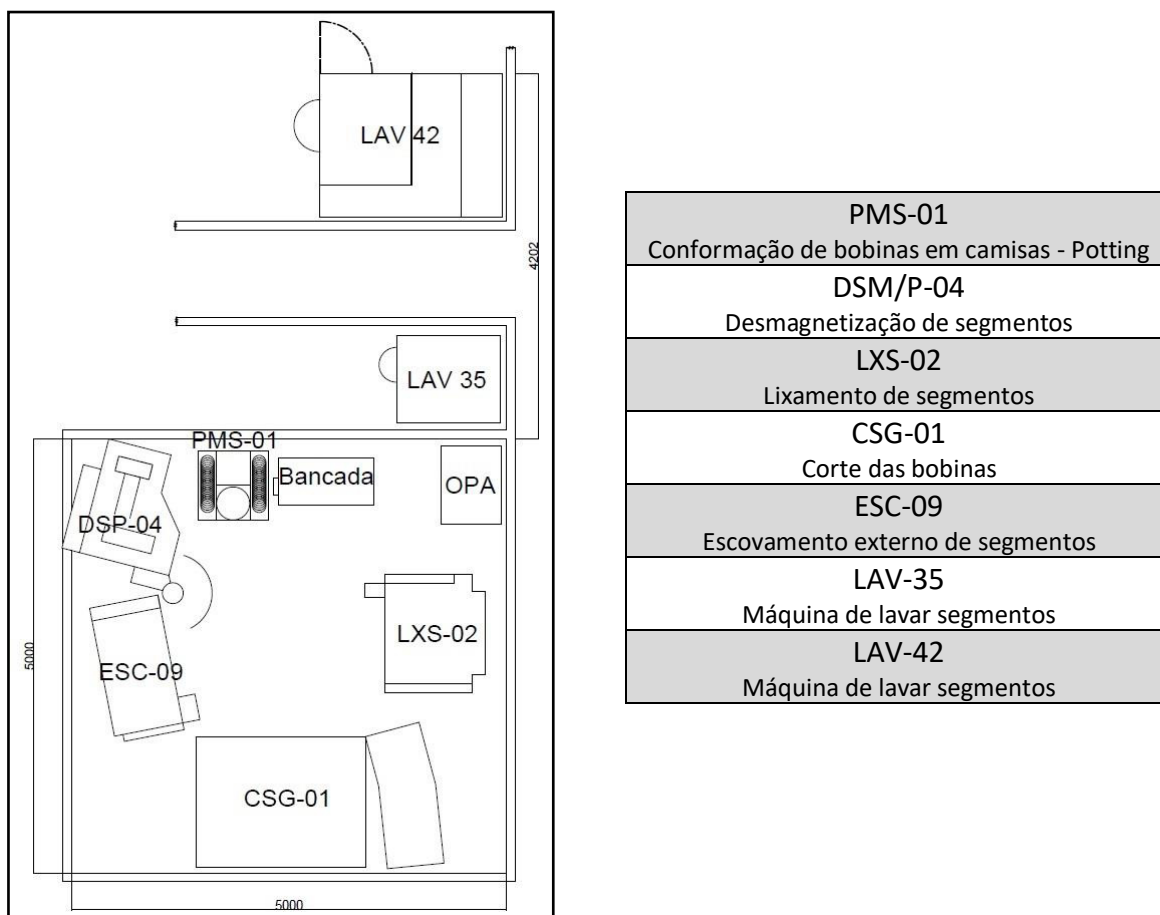


Figura 13 – Layout Célula 21 (Outubro 2018) - Descrição das máquinas presentes

#### 4.2.2 Composição

Tal como referido anteriormente a Célula 21 é composta por 5 máquinas que auxiliam no fabrico dos segmentos e duas máquinas de lavar, como se pode observar na



Tabela 5.

O posto de trabalho associado à célula 21 mostrou ser complexo e desgastante para o

Máquina	Fabricante	Modelo	Nº de série	Bem Patrimonial
PMS-01	COFAP-BRASIL	MOD.2554	-	3747
DSP-04	COFAP-BRASIL	-	-	4149
LXS-02	MAHLE, COMP. MOTORES S.A.	SF202	103	2992
CSG-01	COFAP-BRASIL	MCS 100	MOD. 2532	3748
ESC-09	COFAP-BRASIL	MOD. 2547	-	3749
LAV-35	MAFAC	SF 60 40	97264878	
LAV-42	DURR	ECOCCUBE	15870	5049

operador encarregue, pois ele tem de manusear 5 máquinas a cada ciclo e ainda registrar as medidas das folgas dos segmentos a cada bobina cortada, sendo que, durante uma OPA (Ordem de Produção de Anel) tem de proceder à carga e descarga das bobinas nas duas máquinas de lavar. Cada carregamento envolve 6 bobinas, o equivalente a 2 varas, ou seja, ao fim de uma OPA de 24.000 segmentos, 48 bobinas, são realizadas 8 cargas e descargas.

Tabela 5 – Descrição das máquinas da Célula 21 – Sub-Linha “Anel 3 peças”

#### 4.2.3 Estrutura e organização

Antes de passar à apresentação das tabelas informativas relativas à Célula 21, é importante saber que AN é sinónimo de *Part Number*.

Tabela 6 – Método operativo da Célula 21

Nas Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8, pode-se verificar a quantidade de ANs produzidos para os diferentes tipos de segmentos e o plano do método de trabalho, respetivamente.

Sub-Linha	Anel 3 peças		
Nº de Turnos	3		
Quantidade de operadores por turno	T1 – 1	T2 – 2	T3- 1
Horas de trabalho por dia [h]	22,5		

**Tabela 7 – Tecnologias de segmentos na Célula 21**

Relativamente a estas quantidades de anéis, os valores são referentes ao ano de 2018.

**Tabela 8 – Descrição das OPAs existentes na Sub-Linha “Anel 3 peças”**

Tipo de Segmento	Altura do anel [mm]	Quantidade da OPA [pcs]	Quantidade bobinas por OPA
Cromado	0,46	23.500	54
Nitretado	0,4 / 0,46	23.500	47 / 54
Nitretado c/ PVD	0,4 / 0,46	20.000	40 / 46
Aço carbono c/ PVD	0,35	22.000	38,5

#### 4.2.4 Intervenientes

Relativamente aos intervenientes deste posto de trabalho, são de destacar 9: o Supervisor da Sub-Linha; o Responsável de Engenharia; o Responsável da Qualidade; o Responsável da Manutenção; o Operador de Qualificação Elevada (OQE) e, por fim, quatro operadores (Figura 14).



**Figura 14 – Intervenientes da Célula 21**

Tipos de Segmentos	Quantidade de ANs
Cromado	9
Nitretado	18
Nitretado com PVD	22
Aço carbono com PVD	4

#### 4.2.5 Fluxo da bobina na Célula 21

Dentro do processo subjacente à Célula 21, é necessário executar as seguintes operações, já mencionadas anteriormente, para que seja obtido um resultado final que satisfaça o pedido dos clientes (Figura 15):

1	•Lavagem da bobina
2	•Conformação da bobina em camisa - "Potting"
3	•Montagem da árvore
4	•Lixamento
5	•Corte
6	•Escovamento
7	•Desmagnetização
8	•Desmontagem da árvore
9	•Inspeção visual e medição da folga

Figura 15 – Operações realizadas pelo operador na Célula 21

#### 4.2.6 Tempos standard dos processos por tecnologia de anel

Estes parâmetros de trabalho foram retirados das IPs relativas a cada uma das máquinas, assim como confirmados posteriormente através da sua observação. No entanto, os valores relativos à bancada, PMS-01 e DSM-04 não estão providos de qualquer IP, pelo que os tempos indicados foram resultado de um estudo de tempos, apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Tempo e parâmetros de processamento por tipo de segmento da Célula 21

	Cromado	Nitretado	Nitretado com PVD	Aço com PVD
	CSG-01			
Velocidade do Rebolo [m/s]	40	35		
Velocidade de avanço [mm/rev]	0,04	0,03		
Tempo de Corte [min]	2,55	3,55		
	LXS-02			
Rotação da árvore [rpm]	350	400		
Velocidade da lixa [mm/min]	1,1			
Tempo de execução [min]	2	0,5		
	ESC-09			
Tempo com reversão [s]	0,83		0,5	
Pressão [kgf/cm2]	1		1 a 1,5	
	ESC-09 para "Pré-PVD"			
Tempo com reversão [s]			0,67	0,5
Pressão [kgf/cm2]			1	
	PMS-01			
Tempo operador (Top) [min]	*0,21			
Tempo máquina (min) [min]	0,94			

	Bancada	
Tempo operador (Top) [min]	*1,46	
	DSM-04	
Tempo operador (Top) [min]	*0,43	*0,55
	Encamisar	Desencamisar

\*valores médios



## 5. Dados recolhidos

Relativamente aos dados recolhidos, de forma a que no fim deste estudo os resultados fossem o mais fiáveis possível, começou-se por analisar o Plano de Vendas de 2018 a 2023 que fornece uma previsão daquelas que serão as vendas relativas à sub-linha em causa, tendo em conta, o facto de que a procura pelos segmentos com revestimento PVD irá aumentar. De seguida, passou-se a execução de uma análise daquilo que é o histórico de produção da Célula 21, que envolveu: a produtividade média ao longo do ano de 2018, deste posto de trabalho. Seguindo a Folha de Registos onde os operadores assentam toda a produção assim como justificam as perdas de tempo em cada OPA, foi possível perceber quais as tarefas que ocorriam com maior frequência e maior duração ao longo do ano. Foi construído, assim, um Gráfico de Pareto, por forma a perceber quais as tarefas de valor não acrescentado mais críticas. Foi também, realizado um estudo de tempos relativo a todo o processo, desenhado um Gráfico de *Gantt* de um ciclo e calculada a percentagem de ocupação por parte de todos os recursos existentes na Célula 21. Por último, foram ainda feitos Diagramas de Deslocamento (*Spaghetti Charts*) de todos os operadores, para tentar perceber qual o método de trabalho que cada um utilizava, se havia diferenças entre eles ou não, assim como, se havia deslocamentos que poderiam ser evitados.

### 5.1 Plano de vendas 2018-2023

O estudo desenvolvido foi efetuado considerando a previsão da procura para os próximos 4 anos, mais concretamente até 2023, inclusive. O Plano de Vendas 2018-2023 encontra-se na Figura 16:

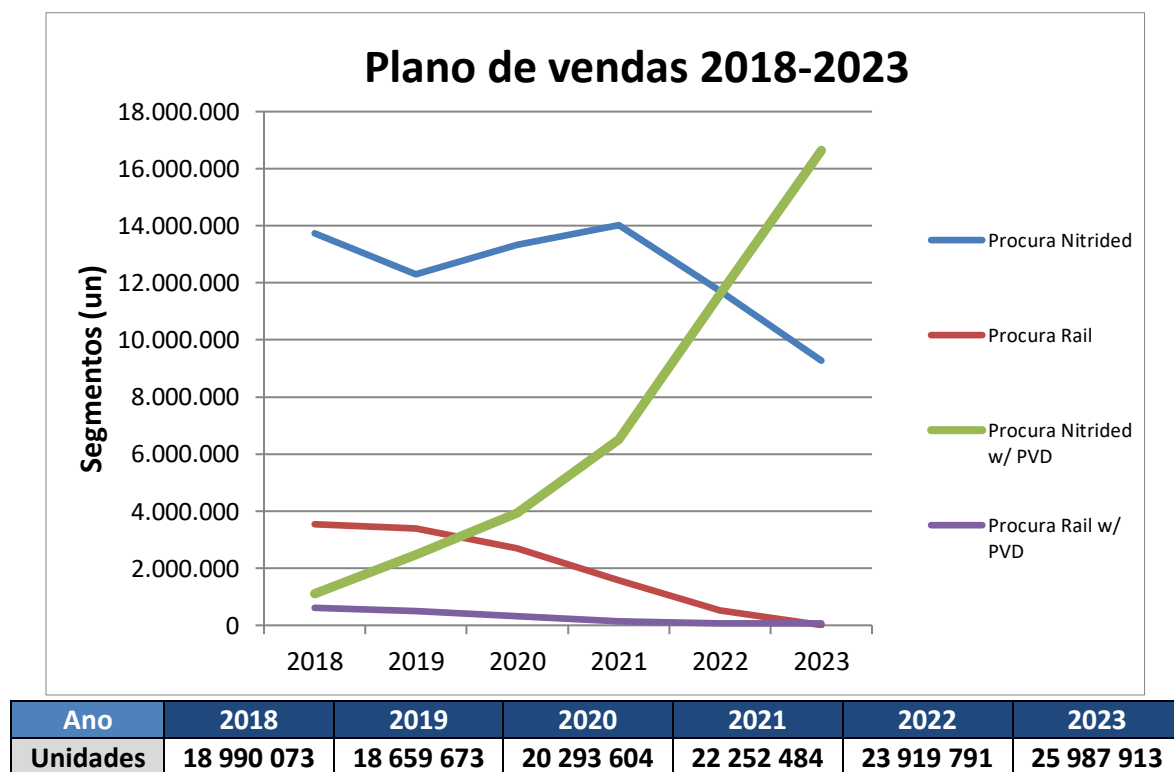


Figura 16 – Plano de vendas 2018-2023, Segmentos da Sub-Linha “Anel 3 peças”

Como foi referido anteriormente, existem 4 tipos de tecnologias: os Cromados, os Nitretados, os Nitretados com PVD e os Aço Carbono com PVD. Para uma melhor interpretação daquelas que irão ser as necessidades da MAHLE relativamente a este tipo de tecnologia, decidiu-se dividir estes tipos de ANs em duas categorias: sem PVD, dos quais fazem parte os Cromados e os Nitretados; e com PVD, aqueles a que é adicionada uma camada de PVD. A razão desta diferenciação deve-se ao facto de que a complexidade dos segmentos com PVD ser mais elevada no que toca à sua produção na Célula 21. Como já foi mencionado, estes segmentos com PVD fazem duas passagens na Célula 21, em que na primeira passagem faz-se o processo tradicional, mas sem contemplar as operações de corte e medição (o chamado processo Pré-PVD) e, só após a operação de PVD é que a OPA retorna à Célula 21 e faz o processo tradicional completo (Pós-PVD). Assim, ao observar-se a crescente subida na procura dos segmentos com PVD (a qual representou 5,8% da produção da Célula 21 em 2018, mas em 2023 espera-se que passará a representar 64%), percebe-se que a complexidade produtiva nesta célula de trabalho irá aumentar significativamente pois 64% dos segmentos terão de realizar duas passagens neste posto de trabalho, levando assim a tempos de ciclo mais elevados, maiores perdas de tempo com *setup*, assim como diminuição do OEU. O aumento na procura de 27% entre 2018 e 2023 é apenas indicativo pois, na realidade, para fazer face ao aumento de complexidade dos ANs na Célula 21, este será mais elevado, uma vez que 16.639.000 dos segmentos passarão a ser processados duas vezes na célula de trabalho em causa.

## 5.2 Método produtivo da Célula 21 de 2018

Relativamente à produção da Célula 21, verifica-se uma média de 1.643.754 segmentos por mês, perfazendo assim um total de 19.725.047 unidades no ano de 2018. Estes dados podem ser observados na Figura 17:

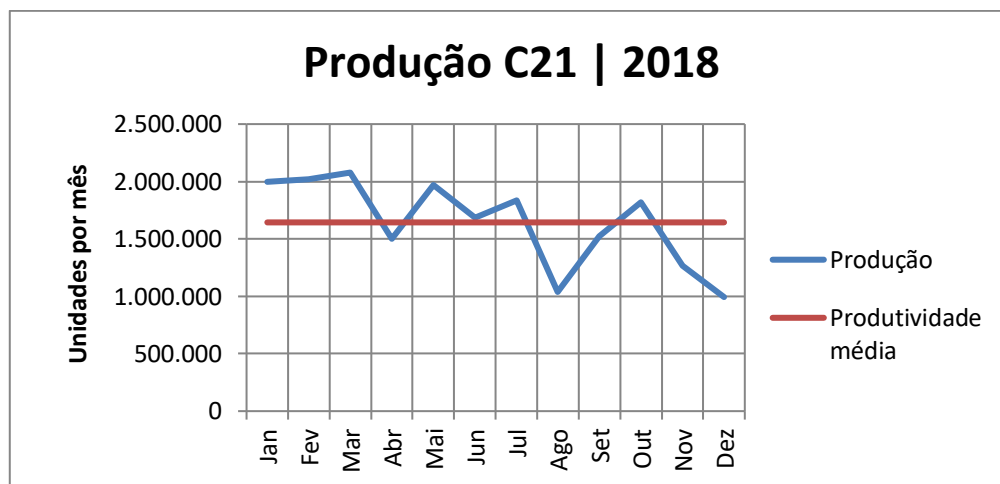


Figura 17 – Produção da Célula 21 em 2018

### 5.3 Frequência e tempo de paragens

Para obter o máximo de informação possível relativa aos motivos de paragens e consequentemente às tarefas que não acrescentam valor ao produto final, foi realizada uma análise à folha de registo de produção da Célula 21, relativa ao ano 2018.

Após esta análise foram obtidos 2 gráficos de Pareto (Figura 18 Figura 19), relativos à frequência de acontecimentos e ao tempo desperdiçado de cada tarefa, respetivamente.

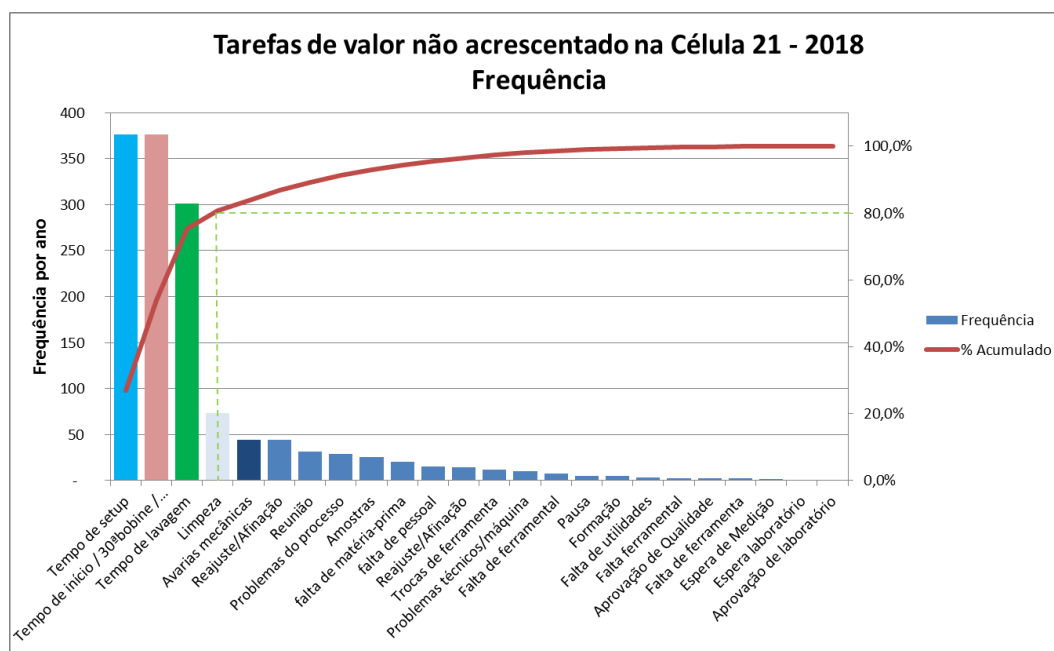


Figura 18 – Pareto de frequência de paragens na Célula 21

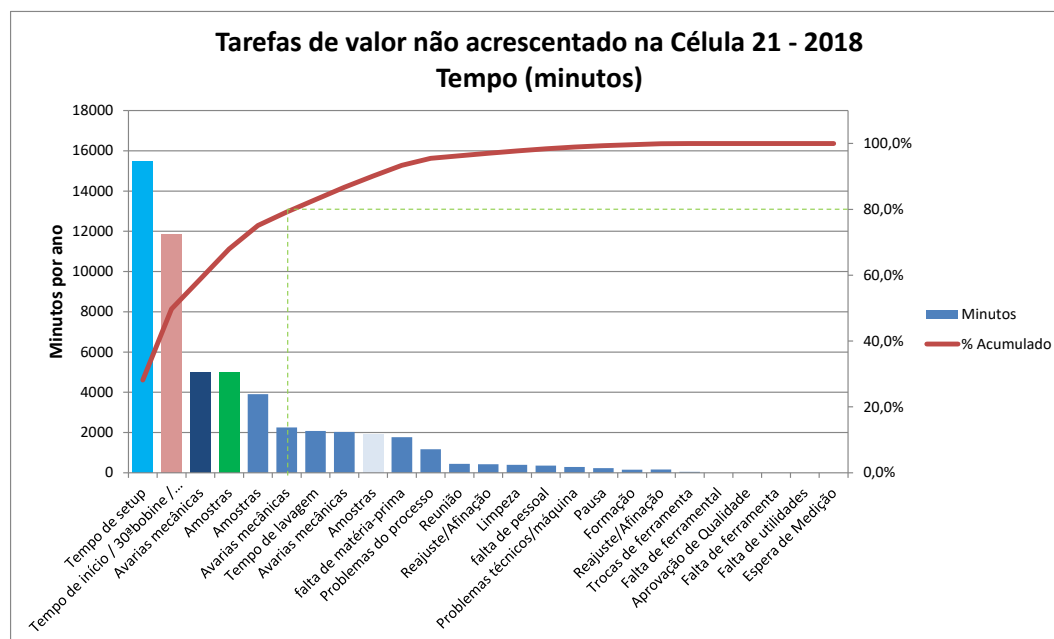


Figura 19 – Pareto de tempo de paragens na Célula 21



Depois de observados estes dois gráficos, conclui-se que deveria ser dada prioridade ao estudo das seguintes tarefas de valor não acrescentado:

- 1- *Setup*
- 2- Início de OPA / Medição da 30ª bobina / Fecho de OPA
- 3- Lavagem

Estas tarefas foram as selecionadas visto serem aquelas que representam maior frequência e maior tempo perdido ao longo do ano 2018. Foi sugerido ao Departamento de Manutenção que fosse realizado um programa de manutenção preventiva a algumas das máquinas existentes nesta célula, com foco nas máquinas CSG-01, LXS-02 e ESC-09, as quais apresentam maior frequência de paragens.

Relativamente aos *setups*, a sua frequência não poderá ser facilmente melhorada uma vez que as OPAs são cada vez mais diversas e exigem diferentes ferramentais, os quais variam consoante o diâmetro do segmento requerido pelo cliente.

No que diz respeito ao segundo ponto, observou-se que a folha de registo de produção era um pouco confusa e de preenchimento pouco prático. Assim, foi realizado uma folha de registo protótipo que teve como principal objetivo reduzir o tempo perdido no preenchimento da mesma, a qual é um dos principais motivos do tempo desperdiçado, através da automatização da mesma. Isto é, o que anteriormente era preenchido individualmente pelo operador passou a ser preenchido automaticamente com apenas 3 ou 4 “*clicks*”. Foi ainda adicionada uma célula que executa o cálculo de refugo automaticamente ( Figura 20), garantindo os seus corretos valores, uma vez que o refugo era calculado anteriormente pelos operadores. Esta tarefa era realizada com alguma lentidão e muitas vezes sem certeza por parte do operador que se via forçado a confirmar o seu cálculo por diversas vezes.

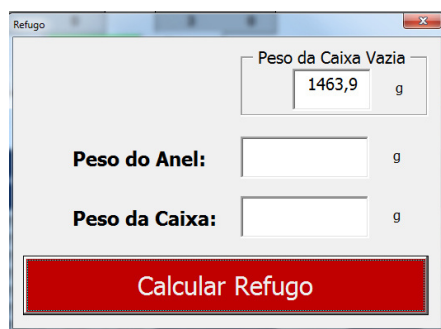


Figura 20 – Caixa de refugo aplicada na folha de registo

Quanto ao terceiro ponto, pouco haveria a ser feito pois estas lavagens são obrigatórias para garantir a limpeza da bobina. Isto significa que, para melhorar o OEU da Célula 21, teria de ser colocado um operador extra a auxiliar nesta tarefa tal como acontece no turno 2.

## 5.4 Gráfico de Gantt dos processos

Foi analisado o processo produtivo de todos os operadores e verificou-se que nem todos praticavam um método estandardizado e eficiente, o que tornou a análise do mesmo mais difícil.

### 5.4.1 Processo completo

O gráfico de *gantt* seguinte demonstra o método de trabalho de um operador em determinado momento, que se traduziu num tempo de ciclo ( $T_c$ ) de 4,57 min. Este tempo foi observado num momento considerado estável, imediatamente após a análise de 5 ciclos que demonstrassem não ter qualquer entrave ao processo, assim como no ciclo em estudo. Para este gráfico de *gantt*, as operações de carga e descarga das máquinas de lavar foram descartadas porque são operações que não estão presentes em todos os ciclos. Por exemplo, numa OPA de 48 bobinas, ou seja, 48 ciclos, são realizadas 8 cargas e descargas das máquinas de lavar, cada uma com a duração de  $5 \pm 0,5$  minutos. O Gráfico de *Gantt* do processo Pós-PVD é apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Gráfico de Gantt do Processo Pós-PVD

	Limpar vara		CSG-ESC
	Encamisar		LXS-CSG
	Confinar		Desencamisar
	DSM-LXS		Medições
	ESC-DSM		

Legenda de apoio para os gráficos de gantt dos processos

MÉTODO PÓS-PVD									
Min	Operação	Homem	DSM 04	PMS 01	LXS 02	CSG 01	ESC 09	Bancada	Tempo
0	Limpar vara								
0,1									
0,2	Encamisar								0,17
0,3									
0,4			Homem						
0,5									
0,6									
0,7	Confinar								0,72
0,8									
0,9									
1									
1,1	DSM-LXS								1,16
1,2									1,25
1,3	ESC-DSM								1,30
1,4	CSG-ESC								1,42
1,5									
1,6									1,64
1,7	Parado								
1,8	LXS-CSG								1,82
1,9									
2									2,00
2,1	Desencamisar								2,10
2,2									
2,3									
2,4									
2,5									
2,6	Medições								2,65
2,7									
2,8									
2,9									2,94
3									
3,1									
3,2									
3,3									
3,4									
3,5									
3,6									
3,7									
3,8									
3,9									
4									
4,1									
4,2									
4,3									
4,4									
4,5									TC=
4,6	Limpar vara								4,57

Observa-se que o método de trabalho em 2018 não é de todo organizado visto que não existe uma ordem concreta daquilo que deve ser o fluxo de processo. Isto porque foi passada uma ordem ao operador em como deve ser dada prioridade à CSG-01 visto ser a máquina gargalo, no entanto, isso não é sinónimo de que essa máquina é o recurso gargalo do posto de trabalho, isto porque a soma das tarefas do operador com as deslocações incluídas, é superior ao tempo de processamento da máquina gargalo, o que indica que o operador deve ter em atenção a sua organização e fluxo de trabalho ao invés de dar prioridade a uma máquina, considerada até ao momento “gargalo” (Tabela 10).

Ao longo da análise dos fluxos do operador, foi observado que o fluxo está constantemente a ser alterado, fazendo com que os operadores se sintam de certa forma perdidos em vários momentos do dia de trabalho, o que dificultou ainda mais a construção do gráfico de *gantt* do processo Pós-PVD.

**Tabela 10 – Ocupação dos recursos da Célula 21**

Tempo de ciclo	4,57	min						
	Homem	DSM-04	PMS-01	LXS-02	CSG-01	ESC-09	Bancada	
Tempo de ocupação	4,47	1,32	1,38	0,50	3,55	1,11	1,36	min
% do TC ocupado	97,8%	28,9%	30,2%	10,9%	77,7%	24,3%	29,8%	
Operações gargalo	4,47				3,55		1,36	min
Carga do operador	97,8%							
Tempo de máquina gargalo parada			1,02	min				

Com a ajuda da Tabela 10, verifica-se o que foi dito anteriormente, ou seja as tarefas afetas ao operador apresentam maior duração do que as da máquina gargalo. Este facto revelou ser um detalhe muito importante na hora de estudar um MTP e fazer a implementação do mesmo, isto porque, anteriormente, tinha sido dada uma ordem pelos superiores de dar prioridade à máquina de corte, mas isso não deve ser feito. Com esta informação foi mais fácil fazer ver aos operadores o que é que era necessário implementar para melhorar o método de trabalho.

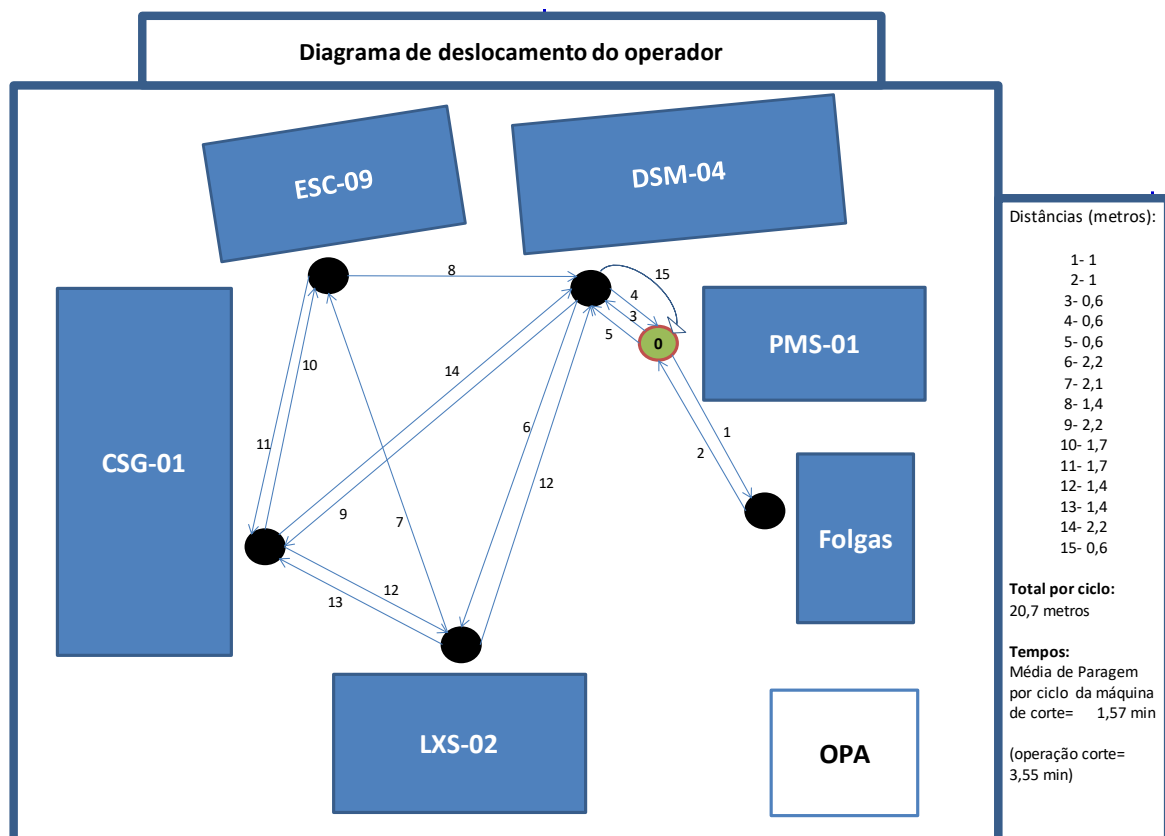
#### 5.4.2 Processo “Pré-PVD”

Foi ainda importante observar o processo Pré-PVD, para passar à construção de um gráfico de *gantt* do mesmo (Tabela 11), sendo que as premissas para este estudo foram as mesmas que para o gráfico de *gantt* do processo Pós-PVD. Foi, no entanto, um estudo mais fácil de realizar, visto que o fluxo era quase sempre o mesmo e as paragens associadas eram assim menores.



Foi ainda possível observar que a máquina gargalo é a CSG-01, no entanto o gargalo absoluto é o operador pois é o que apresenta mais carga de trabalho ao longo do ciclo, comparativamente às máquinas, resultando assim numa célula de trabalho que requiere bastante dedicação e coordenação por parte do operador.

Para um melhor entendimento daquele que é o fluxo dos operadores foi realizado um diagrama de deslocamentos (*Spaghetti Chart*) para cada operador. Após o estudo desta tarefa, foi possível confirmar a má organização do fluxo por parte dos operadores, primeiro porque o seu fluxo entre ciclos nem sempre era idêntico, segundo porque estes por vezes realizam deslocamentos desnecessários, levando assim a um maior cansaço ao longo do dia, e terceiro, foi possível reparar que os operadores nem sempre utilizavam os *buffers* entre máquinas da melhor forma. De maneira a facilitar o método de trabalho e aplicar melhorias ergonómicas, seria de grande importância colocar um sistema de descarga automática para que o operador não tivesse de realizar tantas deslocamentos.



**Figura 21 – Diagrama de deslocamentos do operador**

Após a aplicação de um MTP e do sistema de descarga automático os deslocamentos do operador poderiam ser reduzidos em 40%, passando assim de 20,7 metros por ciclo para 12,6 metros por ciclo, o que levaria também a uma redução do tempo de ciclo da Célula 21.



## 6. Resultados

Após a análise de todos os pontos anteriores, passou-se assim à execução e estudo de medidas que visaram melhorar o *output* da Célula 21, assim como a melhoria do fluxo de trabalho do operador.

### 6.1 Introdução de um Método de Trabalho Padronizado

Um dos primeiros passos, passou por estabelecer um Método de Trabalho Padronizado (MTP) (Figura 22), para ser afixado nesta área de trabalho com vista a melhorar o tempo de ciclo (máximo aproveitamento da máquina gargalo – CSG-01), criar um fluxo constante, reduzir o número de deslocações por parte do operador e também para ajudar na formação de futuros operadores desta célula.



Figura 22 – MTP aplicado e implementado na Célula 21

No MTP constam as seguintes informações:

- Tempos dedicados ao *setup* com detalhes referentes a cada máquina.
- As operações aplicadas à bobina, assim como uma imagem descritiva do seu fluxo.
- O fluxo de trabalho que o operador deve seguir para obter o máximo rendimento, assim como imagem descritiva.



- Aviso de introdução dos resultados das medições no programa QDAS (*Quality Data Analysis System*).
- Notas importantes para melhorar o método de trabalho coletivo.
- Tabela indicativa do *Takt time* necessário para determinado dia / semana (a preencher pelo Supervisor da Sub-Linha “3 peças”).

Na Figura 23, é possível observar a aplicação do MTP junto da bancada, na Célula 21.



Figura 23 – Aplicação do MTP na Célula 21

### 6.1.1 Comparação de cenários – Outubro 2018 VS MTP

Após a implementação deste MTP, o mesmo foi testado com todos os operadores para que fosse possível recolher as suas opiniões por forma a verificar se seria possível aprovar este método de trabalho. Estes testes decorreram com o processamento do mesmo segmento várias vezes, para que fosse possível obter resultados reais e plausíveis.

Com esta aplicação foram reduzidas as discrepâncias dos tempos de ciclo, assim como o tempo de ciclo médio, como mostra a Tabela 12.

**Tabela 12 – Testes realizados sem MTP e com MTP**

Nº da amostra	Tc (Op. 1) [min]	TC (MTP Op.1) [min]		Tc (Op. 2) [min]	TC (MTP Op.2) [min]
1	4,90	3,95		3,84	3,70
2	4,03	4,10		6,28	3,83
3	4,55	4,13		5,11	4,11
4	4,42	3,70		4,39	3,73
5	4,70	3,70		3,73	4,16
6	4,28	3,70		4,43	3,81
7	4,03	3,92		4,76	3,96
	<b>4,42</b>	<b>3,89</b>	<b>AVG [min ]</b>	<b>4,65</b>	<b>3,90</b>

Observa-se que em ambos os casos houve uma melhoria significativa com a aplicação deste método de trabalho, representando, assim, um aumento produtivo de 9,2 bobinas por turno o que, ao longo de 1 ano, se traduziria em cerca de 3.174.00 segmentos, caso o OEU fosse de 100%. Ou seja, a Célula 21, teoricamente, sofreria um aumento de capacidade produtiva de cerca de 15% para o ano de 2019. Apesar disso, visto que o operador perde muito tempo com as mudanças de OPA, *setups*, etc, pode ser afirmado que esses 3.174.000 segmentos produzidos a mais são de certa forma o teto de melhoria deste MTP, levando assim a estimar que terá um aumento de produção entre 5 a 10% e, adicionalmente, trará melhor organização e fluxo por parte do operador.

### 6.1.2 Diagrama de deslocações conforme MTP

De seguida, observa-se o gráfico de deslocações do operador ao executar todo o processo a partir do MTP (Figura 24).

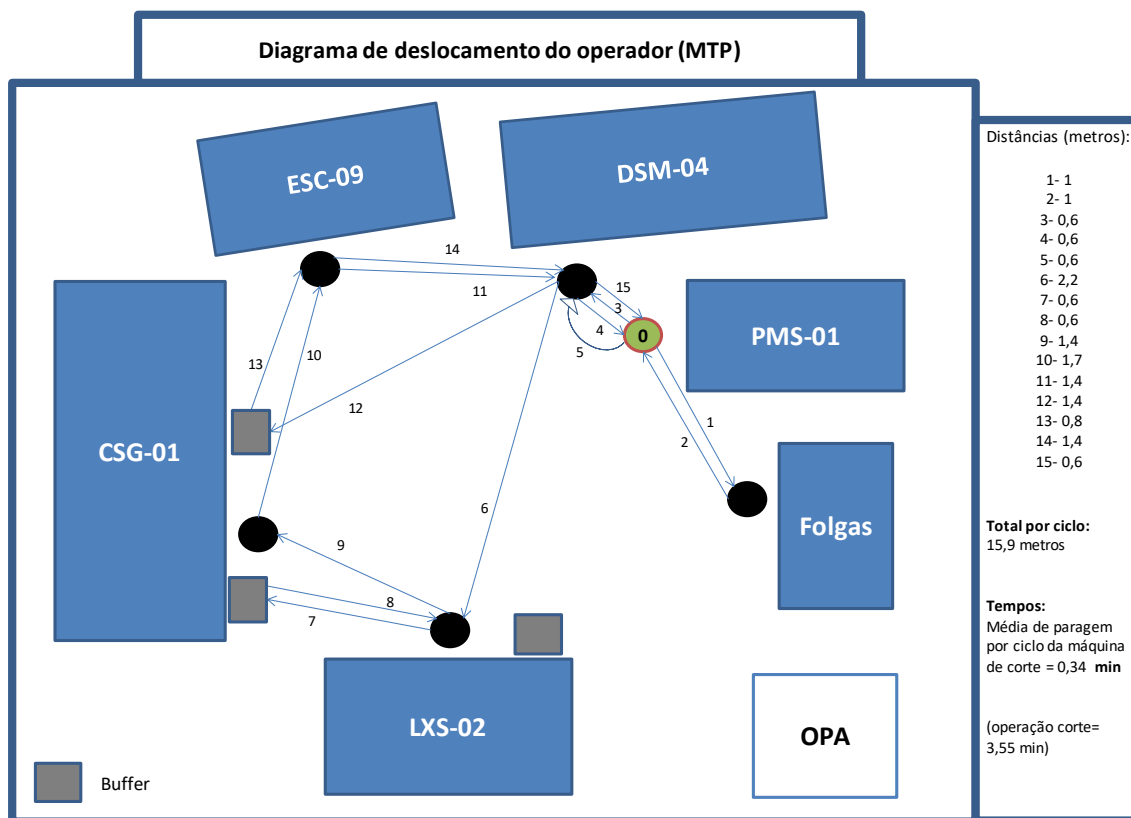


Figura 24 – Diagrama de deslocações do operador conforme MTP

Contudo, deve ser destacado que este teste do MTP foi realizado num cenário sem descarga automática o que não permite ao operador reduzir significativamente as suas deslocações. Apesar disso, com a implementação do MTP passou-se de uma distância percorrida por ciclo de 20,7 metros para 15,9 metros, o que equivale a uma redução de mais 20% nas deslocações. Ao fim de uma OPA de 48 bobinas o operador faz cerca de menos 230,4 metros. Se for tido em conta que um operador em Outubro de 2018 produzia em média 60 bobinas por turno, isto equivale a uma distância percorrida de 1242 metros para o fluxo original do operador, enquanto que com o MTP o mesmo número de bobinas seria produzido com uma distância percorrida de apenas 954 metros, ou seja, menos 288 metros.

## 6.2 Sistema de descarga automática

De forma a reduzir ainda mais esta distância percorrida pelo operador, pode ser feita a aplicação de um sistema de descarga automática. Foi desenvolvido um protótipo para este sistema (Figura 25) que permite ao operador carregar as máquinas com as bobinas sem que este tenha de avançar e recuar vezes sem conta para avançar as bobinas de máquina para máquina.

Na figura seguinte, observa-se, então, o protótipo de descarga automática assim como o seu método de funcionamento.

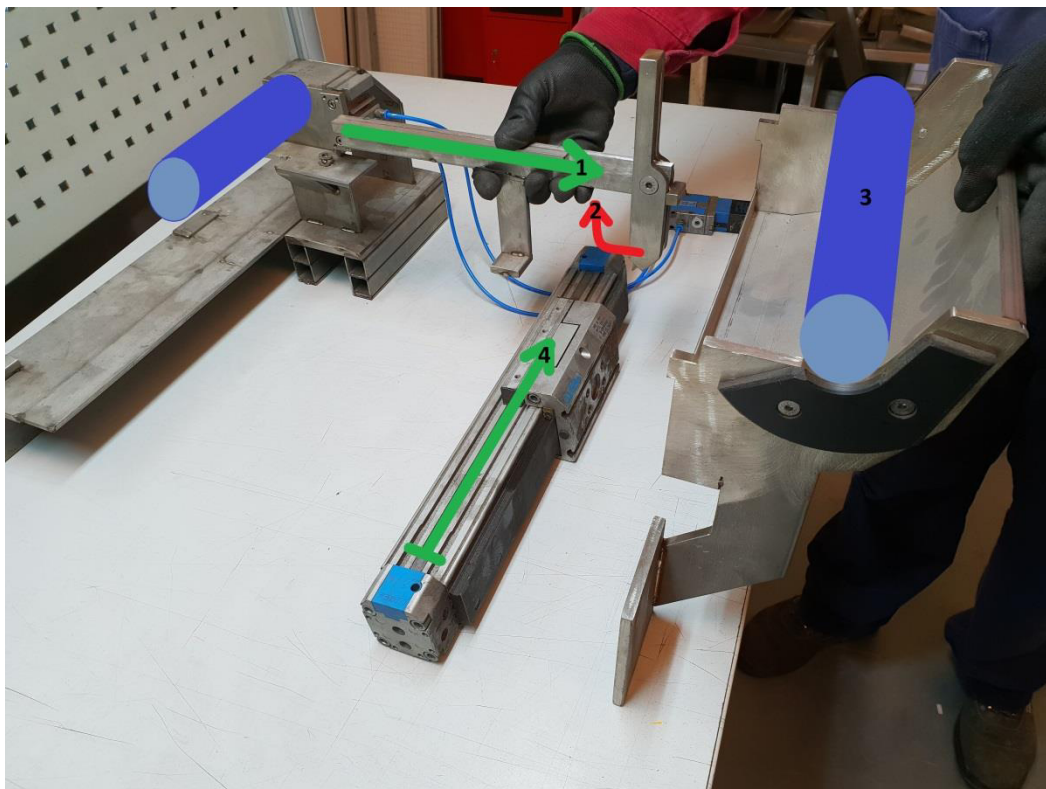


Figura 25 – Protótipo de descarga automática

### 6.2.1 Método de funcionamento

O conceito deste protótipo passa por acionar um cilindro pneumático que retira a bobina do contraponto, imediatamente após a bobina desce através de duas guias (1), até rodar a alavanca (2) que faz uma extensão da guia até ao cesto (3) onde a bobina ficará a aguardar pelo operador. De seguida, de forma a que este cesto não fique a importunar o abastecimento dessa mesma máquina, há um sistema pneumático (4) que desloca o cesto com a bobina para a direita, fazendo com que este fique ainda mais perto da próxima máquina a abastecer. Tem assim a vantagem de reduzir a distância percorrida pelo operador em 21% comparativamente ao cenário do MTP, eliminar 4 levantamentos (que eram desnecessários) das árvores com as bobinas, por ciclo, que pesam entre 5,5 e 7,2 kg, e ainda diminuir o tempo de ciclo que passaria de 3,89 para 3,65 minutos, ou seja uma redução de 6,2%.

### 6.2.2 Diagrama de deslocamento com descarga automática

Na Figura 26, é possível observar o Diagrama de Deslocamento do operador relativo ao cenário do MTP com descarga automática.

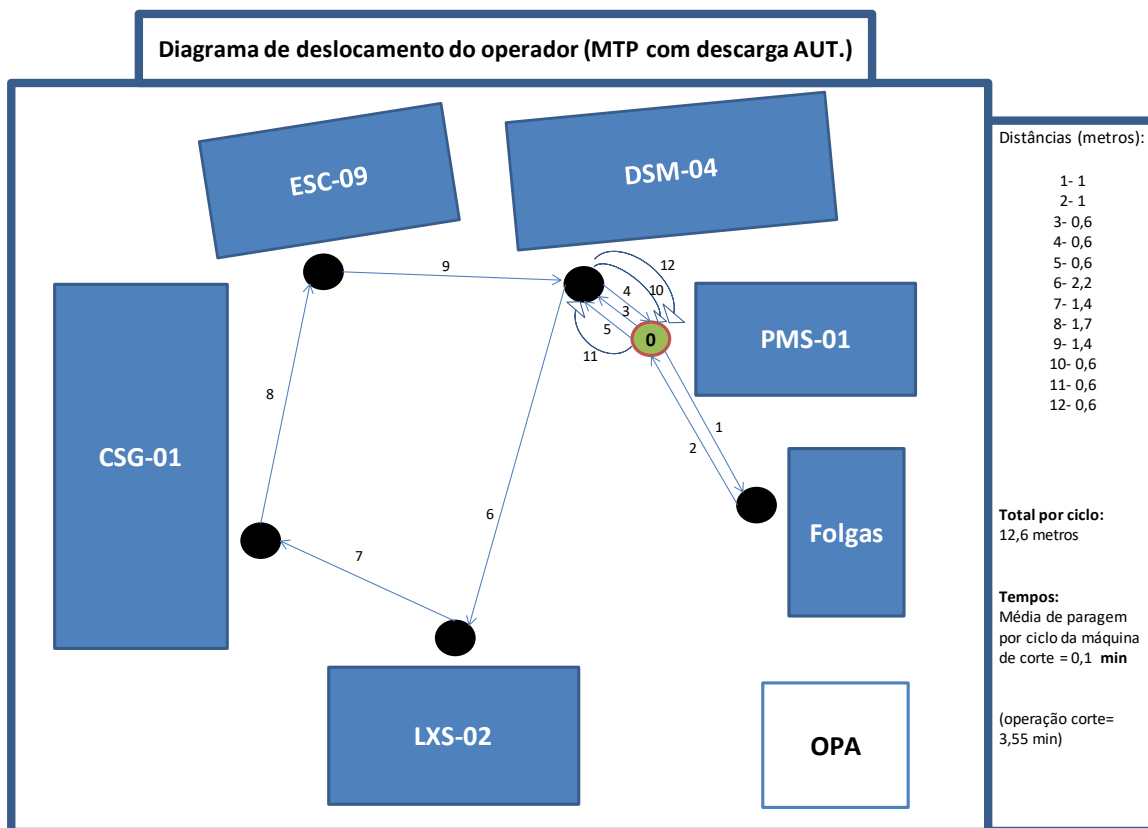


Figura 26 - Diagrama de Deslocamento do operador (MTP com descarga automática)

Com este sistema verifica-se assim uma melhoria de 40% relativamente ao cenário inicial observado em Outubro de 2018, e de 21% quando comparado com o diagrama com o MTP.

### 6.2.3 Desvantagens

Para a aplicação deste conceito, são necessários 3 conjuntos, um para cada máquina, sendo que esses conjuntos são todos diferentes, uma vez que serão aplicados em máquinas distintas. Isto leva a que cada estudo, projeto e aplicação em cerca de 15.000 euros, originando assim um investimento de 45.000 euros. Ficará à responsabilidade da direção decidir se esta ação deve ser iniciada ou não.

#### 6.2.4 Vantagem

A melhoria no tempo de ciclo não aparenta ser notória para o investimento em causa, contudo proporcionaria um menor desgaste ao operador reduzindo as suas deslocações por ciclo em 21% e o número de levantamentos do ferramental.

### 6.3 Estudo analítico de cenários para a melhoria da Célula 21

Antes de serem propostos diferentes cenários que possam ser implementados para fazer face ao aumento da procura nos próximos anos, foi necessário realizar um estudo analítico da capacidade produtiva tendo em consideração todos os tipos de segmentos, no entanto o foco principal foi o segmento Nitretado e Nitretado com PVD. Este estudo foi meramente teórico recorrendo a valores estimados com o objetivo de efetuar uma comparação com os dados de *output* fornecidos pelo *software* de simulação de processos.

Este estudo teve por base os dados que se encontram nas seguintes tabelas:

**Tabela 13 – Previsão da procura 2019-2023 com quantidades de segmentos PVD discriminadas**

Procura 2019-2023					
	2019	2020	2021	2022	2023
Rail	3.395.023	2.697.814	1.577.462	530.015	7.926
Nitrited	12.303.850	13.335.390	14.021.862	11.726.144	9.273.217
Nitrited PVD	2.464.800	3.940.400	6.505.160	11.595.632	16.638.770
Rail PVD	496.000	320.000	148.000	68.000	68.000
<b>Qtd Total</b>	<b>18.659.673</b>	<b>20.293.604</b>	<b>22.252.484</b>	<b>23.919.791</b>	<b>25.987.913</b>
<b>% PVD</b>	<b>16%</b>	<b>21%</b>	<b>30%</b>	<b>49%</b>	<b>64%</b>
<b>Qtd Total efetiva</b>	<b>20.510.173</b>	<b>22.956.354</b>	<b>26.410.709</b>	<b>31.209.561</b>	<b>36.429.644</b>

Na Tabela 13, pode observar-se a quantidade total efetiva do número de segmentos que teria de passar na Célula 21 caso o processo Pré-PVD continue a ser realizado neste posto, ou seja, sem que haja qualquer investimento em máquinas.

Na Tabela 14, pode-se observar o *output* máximo médio da Célula 21, tanto para 230 dias como para 270 dias de trabalho.

**Tabela 14 – Output máximo da Célula 21 em 2018**

<b>Output MÁX da Célula 21 – 2018</b>			
	<b>teórico</b>	<b>real</b>	
Turno	52.326	30.000	Unidades
230 dias	28.883.721	20.700.000	Unidades
270 dias	33.906.977	24.300.000	Unidades

Pode-se verificar que a diferença do *output* teórico para o real está relacionada com o OEU da Célula 21, isto é, o *output* real máximo é de 57% sendo que, por vezes, pode ser ligeiramente superior.

### 6.3.1 Output futuro

Tal como referido anteriormente, prevê-se que a procura de segmentos com revestimento PVD irá aumentar até 64% até ao ano 2023, o que terá um elevado impacto no *output* da Célula 21, uma vez que a quantidade de segmentos a serem processados neste posto será mais elevada, no entanto a máquina de corte em particular, tende a estar mais tempo parada.

Sendo a produtividade atual máxima da célula 30.000 segmentos por turno, sendo que este número nem sempre é atingido devido a paragens, esta representa, ao fim de um ano, 24.300.000 segmentos, quando realizada uma produção de 270 dias (de 2ª feira a sábado). Desta forma, observa-se que, devido ao aumento da procura do anel PVD, apenas é possível satisfazer a procura até 2020 inclusive se não for efetuada nenhuma melhoria neste processo. Assim, o estudo de melhoria desta área é essencial para que seja possível satisfazer a procura dos clientes pelo menos até 2023 (Figura 27).

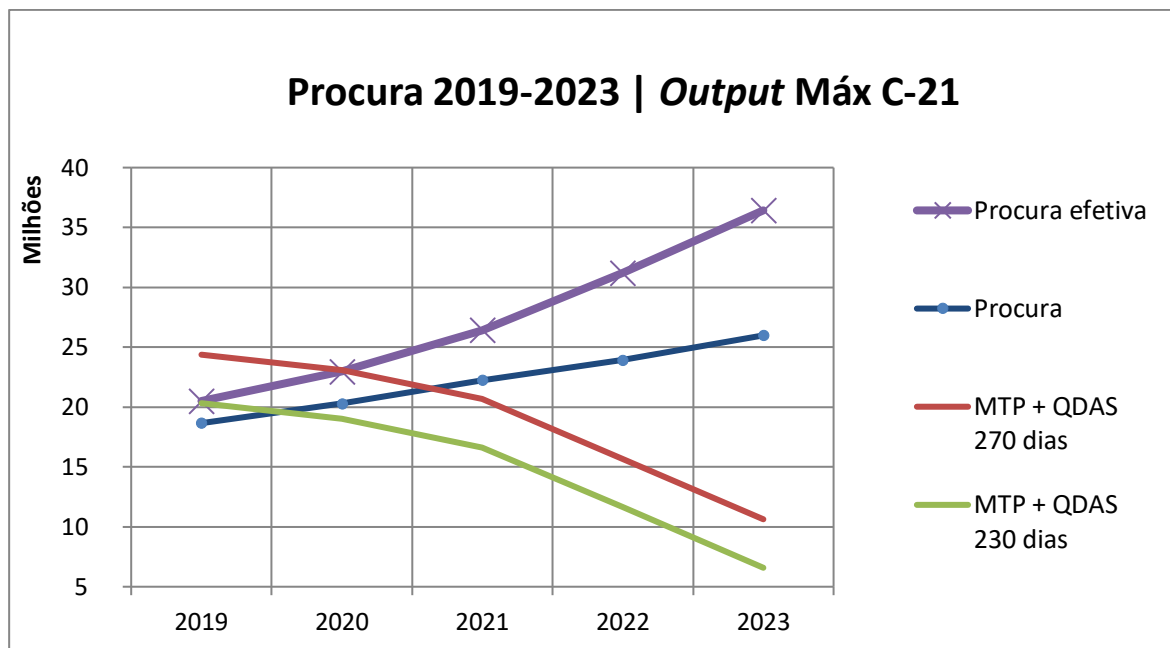


Figura 27 – Procura 2019-2023 | Output máximo da Célula 21 para 230 e 270 dias

### 6.3.2 Cenários abordados

Numa primeira fase foram considerados três cenários que foram apresentados numa reunião onde estiveram presentes, o Diretor do Departamento de Engenharia, o Diretor de Produção, o Supervisor da Sub-linha “3 peças”, o Engenheiro de Processo e o Engenheiro de Métodos e Tempos. Nessa reunião foi assim feita uma breve apresentação do trabalho executado até ao momento e mostrou-se uma pequena simulação já feita no *software* FlexSim com os três diferentes cenários, nomeadamente:

- 1- Atual,
- 2- Aplicação de *robot*,
- 3- Ambos os cenários sem que o operador faça a lavagem do anel.

Com esta análise preliminar percebeu-se que, face à elevada carga de trabalho do operador da célula, a aplicação de um *robot* na Célula 21 seria imprescindível, de forma a tornar o processo mais ergonómico para os operadores, permitindo reduzir o tempo e distância de deslocações com as bobinas encamisadas (cerca de 6,5kg). Adicionalmente, foi também proposta a realização de um estudo para o cenário da aplicação de dois operadores.

Com o início deste estudo, foi notório uma vez mais a situação dos segmentos com PVD que realizam a operação de escovamento e lixamento antes de sofrerem esse revestimento. Esta questão levaria a que dentro de dois anos, ou seja, em 2021, este posto de trabalho entrasse em rutura, como se pode observar na Figura 27.

Assim, para fazer face a estas situações, foi feita uma previsão de produção para diferentes cenários (Tabela 15), nomeadamente:



Tabela 15 – Cenários possíveis

Cenários possíveis	
MTP + QDAS	Melhoria atual
A	Operador + <i>Robot</i>
B	2 Operadores
A + Mini-Célula	1,5 operadores + célula pré-PVD + <i>Robot</i>

Para estes 4 cenários realizou-se uma análise em duas fases: a 230 dias – trabalho de segunda-feira a sexta-feira e a 270 dias – trabalho de segunda-feira a sábado, ambos com 3 turnos, com vista a avaliar quais os diferentes tipos de cenários que melhor se aplicam a esta célula de trabalho.

Esses estudos são apresentados de seguida, a 230 dias e 270 dias respetivamente (Tabela 16 e Tabela 17).

Tabela 16 – *Output* estimado para 230 dias para os diferentes cenários

		Investimento	Tciclo [min]	OEU	Output teórico (turno)	Output real (turno)	Output real (dia)	Output real (ano)
MTP + QDAS		0	4	60%	52.326	33.750	101.250	23.287.500
A	Robot + integração	50.000 €	3,5	60%	64.286	38.571	115.714	26.614.286
	Melhoria sopro CSG	1.000 €						
			3,7	70%	60.811	42.568	127.703	29.371.622
B	+ 1 operador (100% dedicado)							
	20.000 € por ano							
Mini Célula PVD + 1 operador (<50% dedicado)								
+	PMS extra	100.000 €	2,5	80%	90.000	72.000	216.000	49.680.000
	Suporte árvore							
	ESC-09 extra							

230 dias

Tabela 17 – Output estimado para 270 dias para os diferentes cenários

			Investimento	Tciclo [min]	OEU	Output teórico (turno)	Output real (turno)	Output real (dia)	Output real (ano)	270 dias
MTP + QDAS			0	4	60%	52.326	33.750	101.250	27.337.500	
A	Robot + integração	50.000 €	3,5	60%	64.286	38.571	115.714	31.242.857		
	Melhoria sopro CSG	1.000 €								
B	+ 1 operador (100% dedicado)		3,7	70%	60.811	42.568	127.703	34.479.730		
	20.000 € por ano									
Mini Célula PVD										
+	PMS extra	100.000 €	2,5	80%	90.000	72.000	216.000	58.320.000		
	Suporte árvore									
	ESC-09 extra									

Tabela 18 – Previsão de capacidade para 270 dias

De notar que os valores assinalados a amarelo são estimados.

### 6.3.3 Análise e conclusão dos resultados

Apesar dos resultados das tabelas anteriores parecerem bastante satisfatórios, não se pode descartar o aumento da produção dos anéis PVD, ou seja, a máquina CSG-01 estará parada mais tempo a cada ano que passa o que se irá refletir na produtividade da C21. Com vista a verificar a necessidade da implementação da Mini-Célula Pré-PVD, sem a qual a MAHLE não conseguirá satisfazer a procura dos clientes, pode-se observar a Figura 28 que apresenta o gráfico de capacidade da Célula 21, a 270 dias, até 2023.

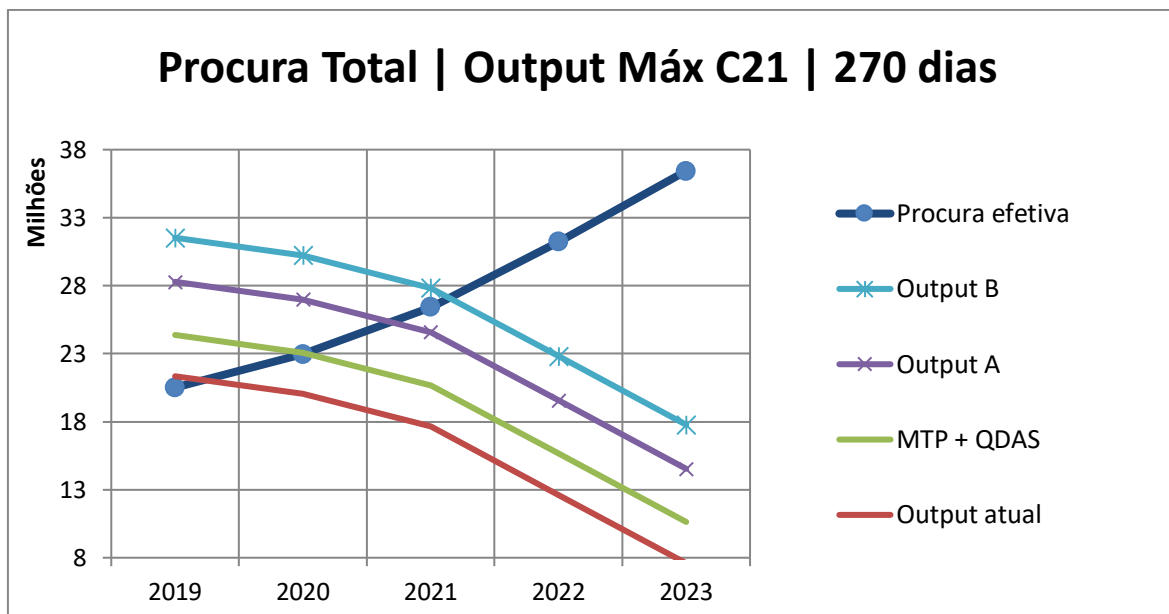


Figura 28 – Gráfico de capacidade da Célula 21 a 270 dias até 2023

Mesmo utilizando os recursos à disposição a 100%, a MAHLE só consegue satisfazer os clientes até 2020, apesar de que, com a colocação de 2 operadores na célula, a procura seria satisfeita até 2021, no entanto com um custo muito elevado. De notar que os princípios da MAHLE não vão de encontro a este cenário (B) pois poderá levar a uma falta de coordenação por parte dos operadores, desentendimentos ou mesmo falta de comunicação entre eles. Contudo para assegurar de que esta ideia estava correta realizou-se um teste no chão de fábrica, com estes dois operadores, e desde logo concluiu-se que, devido à complexidade de tarefas daquele posto de trabalho, seria difícil arranjar um equilíbrio da carga de trabalho de cada um dos operadores. Assim sendo, este cenário foi deixado de parte.

Desta forma, e resumindo, está fora de questão não implantar uma célula paralela para o processo Pré-PVD.

Fazendo uma breve análise teórica aos dados observados nas tabelas, podemos desde logo verificar que os diferentes cenários apresentam tempos de ciclo diferentes, sendo o tempo de ciclo mais elevado (o atual com MTP e QDAS), e o mais reduzido (o cenário A), isto devido às melhorias aplicadas no mesmo, tais como a utilização do *robot* e a melhoria no sistema de sopro da máquina CSG-01. É possível observar que o OEU do cenário B é mais elevado que o cenário A, contudo, cada cenário deve ser avaliado individualmente.

#### 6.3.4 Mini-Célula Pré-PVD

A Mini-Célula PVD, é uma célula paralela de apoio à Célula 21 que ficaria encarregue de executar o processo “Pré-PVD” para os segmentos da Sub-linha de “Anel 3 peças”. Este posto de trabalho seria composto por uma máquina de potting, um suporte de encamisar e desencamisar com desmagnetizador e uma máquina de escovamento. Estas são as máquinas necessárias para

efetuar o processo Pré-PVD. Adicionalmente, está a ser avaliada uma forma de preparar as bobinas para o escovamento por forma a tornar o processo mais rápido, menos dispendioso e mais ergonómico.

Desta forma, seria possível fazer o processo “Pré-PVD” sem que houvesse qualquer interferência com a CSG-01. Com este cenário obter-se-ia um aumento do OEU da Célula 21 bastante significativo dado que, quanto maior for a quantidade produzida de segmentos PVD, menor seria o tempo de paragem da máquina gargalo (CSG-01).

Assim, foi efetuada uma abordagem gráfica onde se pode visualizar os limites de capacidade produtiva relativos a cada cenário para os diferentes dias de trabalho, 230 e 270 dias. Estes cenários já consideram a implementação da Mini-Célula PVD pois, anteriormente, já tinha sido observado que, de outra forma, não seria possível satisfazer a procura dos clientes.

Os valores destas duas tabelas servem ainda para fazer uma análise comparativa com os valores originados pelo FlexSim.

Com a introdução da Mini-Célula Pré-PVD observa-se então o seguinte (Figura 29 e Figura 30):

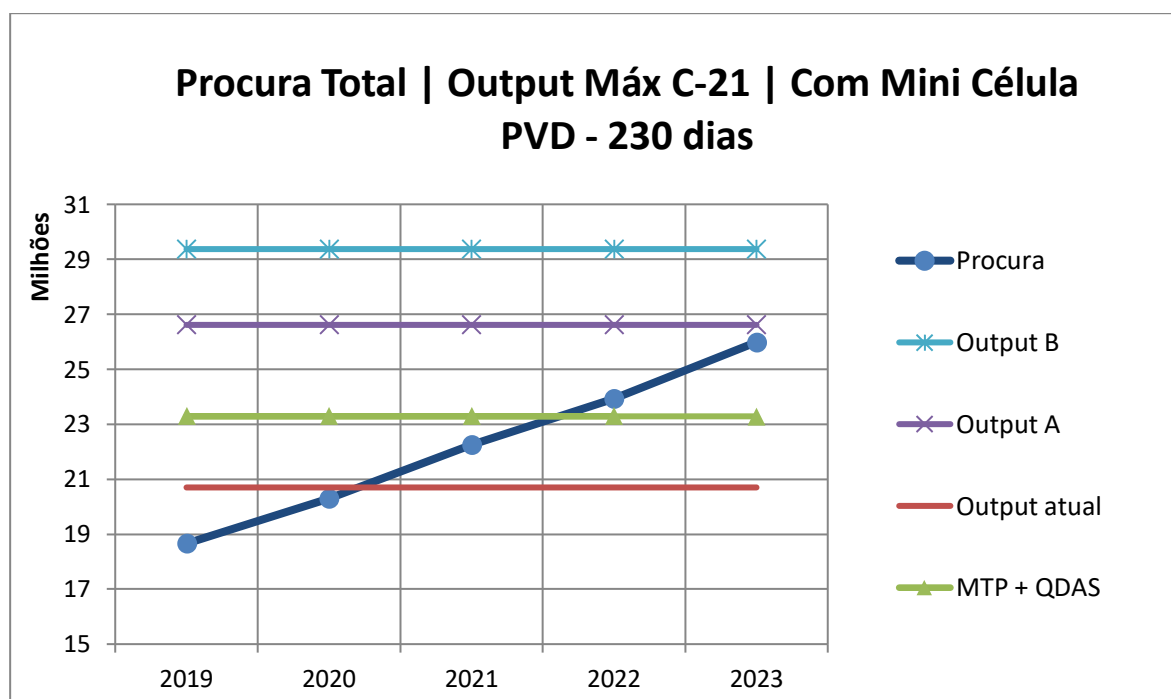


Figura 29 – Previsão de capacidade por cenário a 230 dias com a Mini Célula Pré-PVD

Assim sendo, a capacidade produtiva da Célula 21 em nada seria afetada pelo aumento de produção do anel PVD, fazendo com que fosse possível satisfazer a procura dos clientes após a implementação do *robot* (cenário A).

Observa-se ainda que, com dois operadores alocados à Célula 21 (B), obtém-se um *output* ainda mais elevado, no entanto, conforme o que foi explicado anteriormente, este cenário foi eliminado.

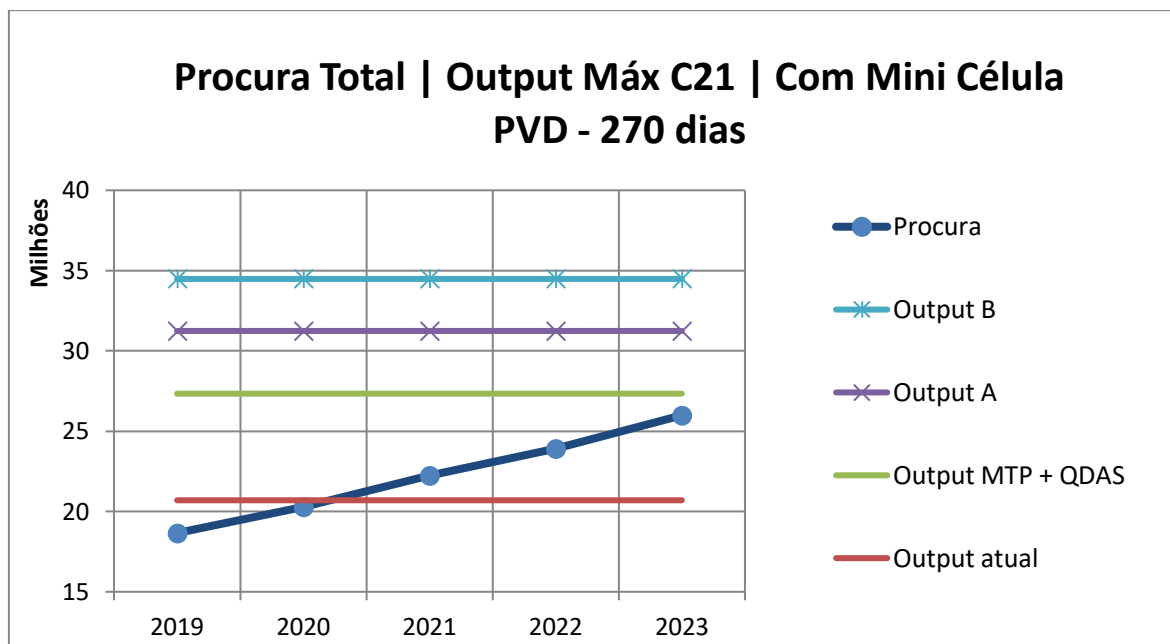


Figura 30 – Previsão de capacidade por cenário a 270 dias com a Mini Célula Pré-PVD

### 6.3.5 Proposta de investimento – Output estimados

Após a análise explicada anteriormente, foi apresentada a proposta de melhoria para a Célula 21 (Tabela 19), baseada no estudo teórico e ainda sem recorrer ao *software* FlexSim, mas considerando a produtividade anual necessária.

Tabela 19 – Proposta de Investimento para o projeto com base em valores estimativos

Proposta Investimento Célula 21					
Início Projeto	Investimento	Previsão de orçamento	Início de Produção	Satisfaz procura até	Dias de trabalho por ano
2019	Robot + Aplicação < 1,5 Operadores	50.000 €	Janeiro 2020	Dezembro 2021	230
	Válvula de sopro e fluídos	1.000 €			
2020	Máquina de Potting	MiniCell PVD 100.000 €	Janeiro 2021	Dezembro 2023	230
	Máquina de Escovamento		Total: 151.000 €		
	Chave de aperto + suporte				

Esta proposta foi dividida em duas fases: um primeiro investimento em 2019 para o *robot*, com vista a melhorar a ergonomia do operador o mais rápido possível. No entanto, este cenário apenas satisfaz a procura até 2020, inclusive. Por esta razão, em 2020 tem de ser realizado um segundo investimento na introdução da Mini-Célula Pré-PVD para que as bobinas Pré-PVD passem a ser processadas na mesma, evitando assim, paragens da máquina CSG-01.

Passa assim a aplicar-se o cenário do *robot* (A) a partir de Janeiro de 2020 e só em Janeiro de 2021 é que se iniciará o projeto de implementação da Mini-Célula Pré-PVD (Figura 31).

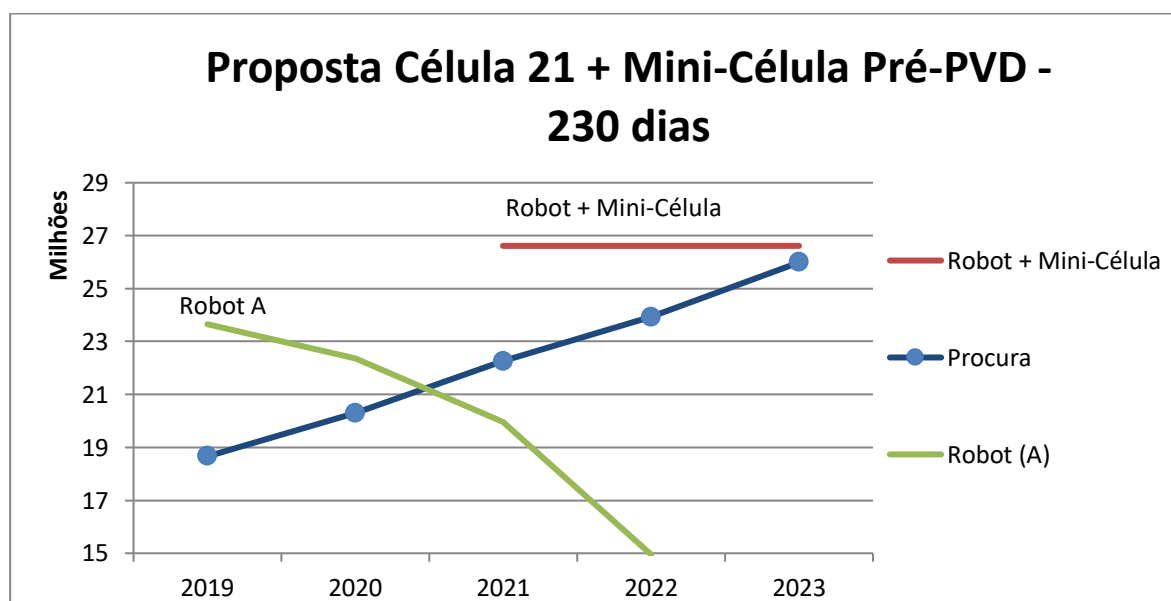


Figura 31 – Proposta de investimento para 2020 a 230 dias

Com esta proposta, seria possível garantir a procura e satisfação dos clientes, dando ainda alguma margem para o caso de a procura sofrer um ligeiro aumento nos anos seguintes pois este posto de trabalho poderá produzir a 270 dias, se necessário.

Relativamente ao *payback*, a aquisição do *robot* apresenta um valor de 0,9 anos e, caso se decida fazer o investimento todo de uma só vez, ou seja, o *robot* mais a Mini-Célula Pré-PVD, o valor será de 1,5 anos, ficando assim, dentro dos dois anos exigidos pela MAHLE para avançar com um investimento.

## 6.4 Simulação do processo da Célula 21 através do FlexSim

O FlexSim é um *software* de simulação de processos onde é possível simular qualquer cenário presente numa indústria, serviço, centro logístico, hospital, etc, para que seja observada e analisada qualquer alteração ao modelo atual e, a partir daí, se possa tirar as conclusões necessárias em relação a essas mesmas alterações.

Assim, podemos garantir que não são feitos investimentos e alterações no processo, sem fundamento, levando a que o risco de investimento seja menor.

Nesse sentido, trabalhou-se na simulação de todo o processo referente à Célula 21 e, após a obtenção dos resultados, foi feita uma análise aos diferentes tipos de cenário que mostraram ser mais viáveis, quando comparados com os valores estimados anteriormente.

Para iniciar esta simulação, foi necessário seguir certos passos associados à construção de um modelo de simulação, de acordo com Law & Kelton (1991). Assim sendo, começou por se fazer uma formulação do problema em questão, a qual foi feita no início deste estudo (passo 1).

### 6.4.1 Recolha de dados



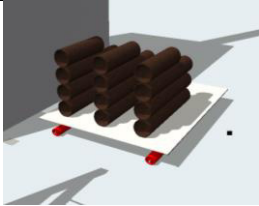

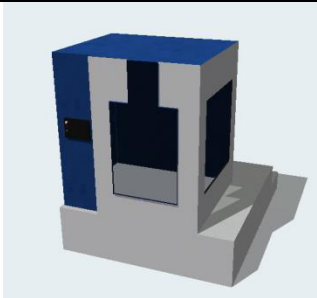
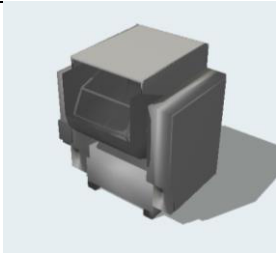
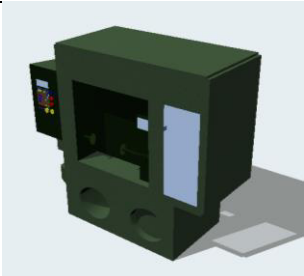
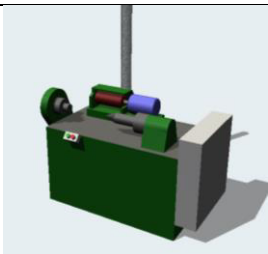

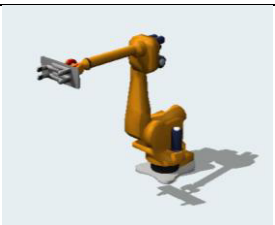
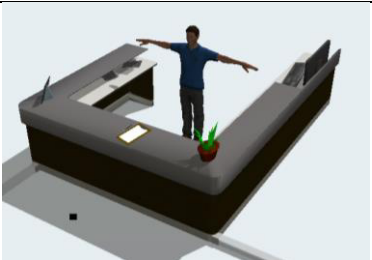
De seguida passou-se à recolha de dados da célula em estudo (passo 2), onde foram analisadas quais eram as entidades e os recursos envolvidos no processo. A entidade são as bobinas que sofrem os processos na Célula 21, estas apresentam propriedades físicas e mecânicas diferentes no início e no fim do processo (Figura 32).



Figura 32 – Entidade

Foram ainda registados os recursos que são: o operador, o supermercado de OPAs (fila), a OPA, as LAVs, a PMS-02, a DSM-04, a LXS-02, a CSG-01, a ESC-09, a bancada, a sala de metrologia, o *robot* e os *buffers* (Tabela 20).

Tabela 20 – Recursos do modelo

		
Operador	Supermercado de OPAs	OPA 1
		
LAV 35	LAV 42	PMS-02
		
DSM-04	LXS-02	CSG-01
		
ESC-09	Bancada	Robot
		Recursos da C21
Sala de Metrologia	Buffer	

Para garantir que o modelo ficava à escala real, todas estas entidades foram medidas e projetadas com as dimensões reais através do *software Autodesk Inventor*, sendo que o mesmo aconteceu com o *layout*.



De seguida, foram analisadas as variáveis globais do processo, que são:

- O modelo inicia no dia 1 às 06:00.
- 3 turnos de trabalho, cada um com 8 horas.
- Foram consideradas pausas de 45 minutos para almoço/jantar/ceia e cada turno tem duas paragens para descanso de 15 minutos cada.
- Modelo constituído por 6 OPAs e cada OPA é representada por 48 bobinas, resultando assim num conjunto de 144.000 segmentos.

Para avaliar o fluxo de processos relativos à produção da bobina (entidade), foi realizado uma abordagem por processos, de forma a garantir que todos os aspetos envolvidos no cenário real fossem representados no modelo, garantindo assim, a sequência do processo. Este diagrama representa o fluxo de todo o processo desde o momento de entrada até à saída das OPAs, da Célula 21. Para isso elaborou-se um diagrama de *Business Process Management Notation* (Figura 33).

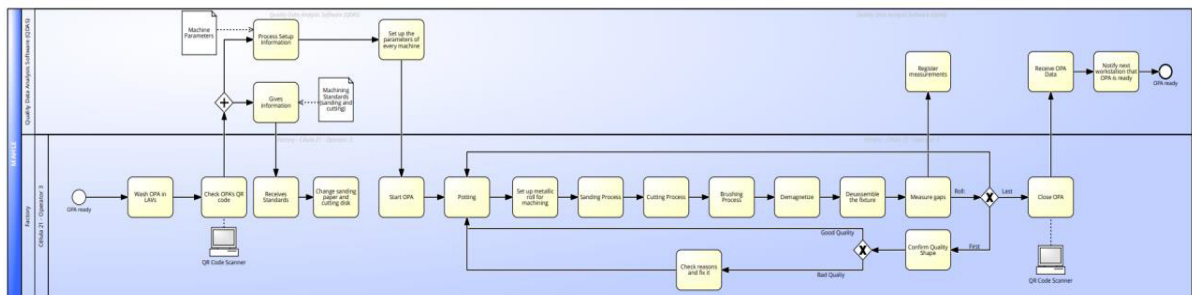


Figura 33 – Diagrama BPMN do modelo de simulação | Diagrama de fluxo

Também é importante analisar as distribuições estatísticas de cada um dos processos envolvidos no modelo. Os tempos foram registados em minutos, sendo posteriormente tratados com o *Software Input Analyzer* do ArenaTM com uma amostra de 10 repetições de cada um dos processos num determinado momento em que não havia qualquer interrupção que tivesse impacto direto nestas tarefas. A funcionalidade deste *software* é a de ajustar distribuições aos dados amostrais e elaborar testes de qualidade de ajuste (Altiook & Melamed, 2010).

A informação relativa aos dados amostrais encontra-se na Tabela 21:

Tabela 21 – Distribuições estatísticas por processos

Máquina	Distribuição estatística	
<div><div>LAV-35</div><div>LAV-42</div></div>	<div><div><div><div>OPA</div><div>TM - 15 min</div><div>LAV-35</div></div><div>uniform(0.6, 0.35) + uniform(0.18, 0.25) + lognormal2(0.01, 0.3, 0.1)</div></div><div><div>TM - 12,5 min</div><div>LAV-42</div><div>uniform(0.6, 0.35) + uniform(0.25, 0.45) + lognormal2(0.01, 0.3, 0.1)</div></div><div><div>OPA</div><div>uniform(0.25, 0.45) + exponential(0.05, 0.015)</div></div></div>	
PMS-01	<div>Conformar - Top lognormal2(0.21, 0.105, 0.0795)</div>	<div>TM 0.94</div>
DSM-04	<div>Encamisar - Top Lognormal2(0.43, 0.114, 0.0709)</div>	<div>Desencamisar - Top lognormal2(0.47,0.114, 0.0709)</div>
LXS-02	<div>Carregamento - Top exponential(0.05, 0.015)</div>	<div>TM 0.54</div>
CSG-01	<div>Carregamento - Top exponential(0.05, 0.015)</div>	<div>TM 3.55</div>
ESC-09	<div>Carregamento - Top exponential(0.05, 0.015)</div>	<div>TM 1.1</div>
Bancada	<div>Medição da folga - Top Lognormal2(1.46, 0.114, 0.0709)</div>	
Sala de Medições	<div>Tempo de espera - Top uniform(8, 15.0)</div>	
C-21	<div>Setup - Top uniform(40, 30)</div>	

#### 6.4.2 Validação

Após a obtenção de todos estes resultados, foi necessária a validação de todos estes dados (passo 3) com o Coordenador do projeto, com o engenheiro de processos e com o Supervisor da Sub-Linha do “Anel 3 peças”. Seguidamente, deu-se início à modelação deste sistema com o *software* FlexSim (passo 4). Esta plataforma é bastante intuitiva tendo por base a linguagem de programação C++.

Durante o desenvolvimento deste modelo, foi necessário ter sempre a certeza de que este se encontrava de acordo com todas as premissas do cenário real e, para isso, optou-se por utilizar o modo mais detalhado do FlexSim, o *Process Flow*, que permite criar toda uma lógica de fluxo no modelo. Esta lógica resultou nos seguintes quadros (Figura Figura 34 e Figura 35).

## OPAs - Criação, Setup, transporte e Lavagem

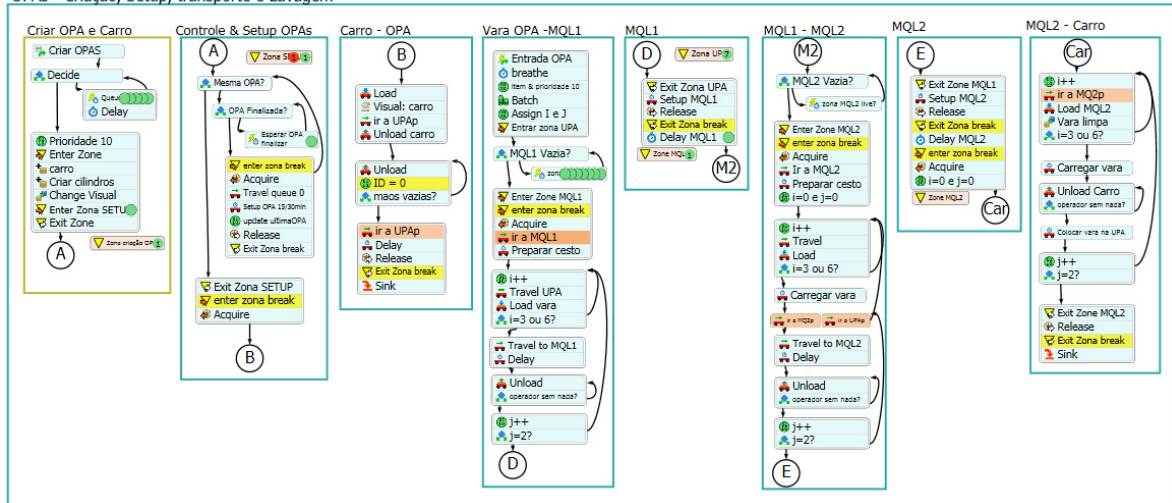


Figura 34 – Process Flow – Criação, Setup, Transporte e Lavagem

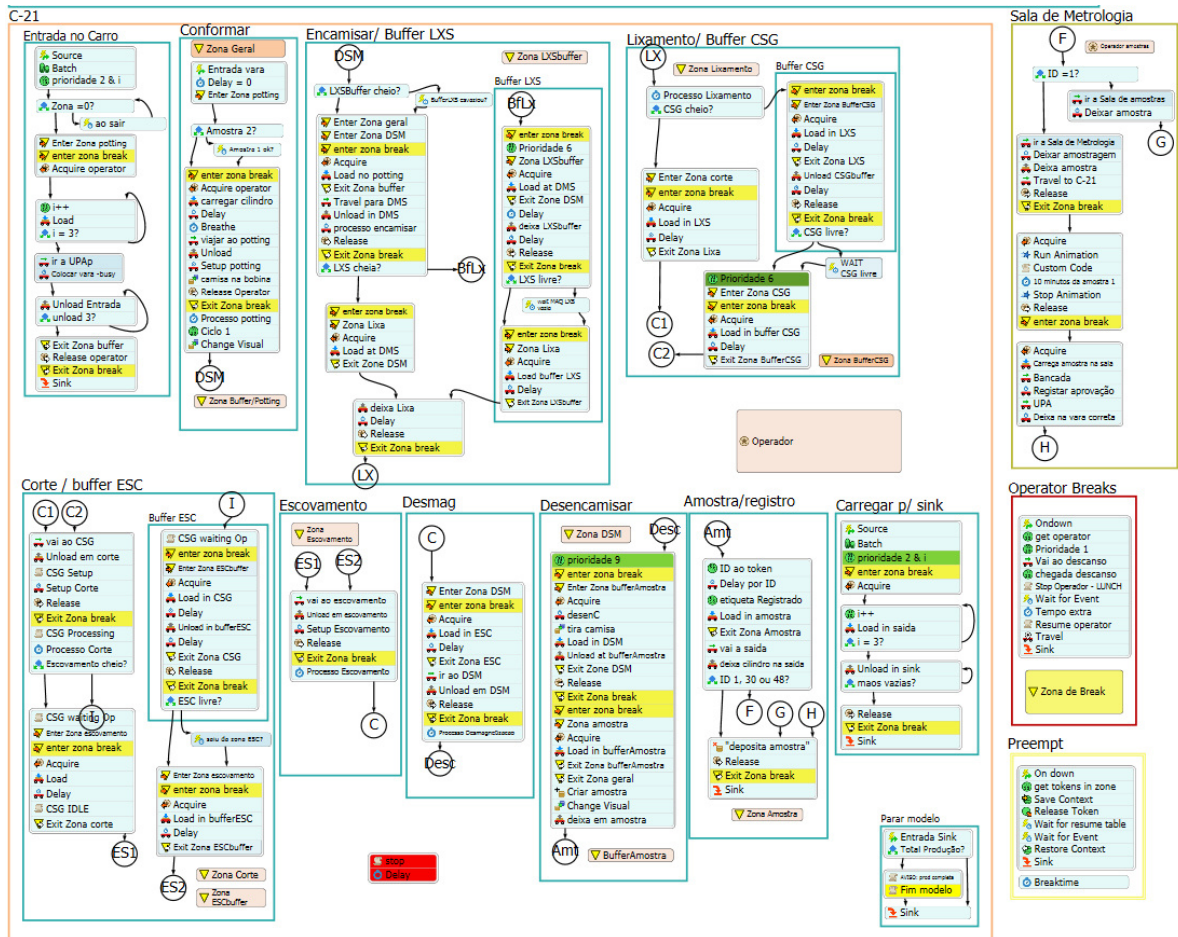


Figura 35 – C21, Sala de Metrologia e parâmetros do operador

Devido a esta lógica foi possível obter um modelo muito idêntico ao cenário real.

Após finalizar este modelo, foi realizada outra validação (passo 6) com o Coordenador do Projeto, o Engenheiro de Processos e o Supervisor da Sub-Linha do “Anel 3 peças” através de testes

pilotos com principal foco no fluxo do processo, assim como nos tempos de cada tarefa e por fim no número de bobinas produzidas por dia. Assim que se observou que todos aspetos estavam conforme o cenário real, o modelo foi dado como validado. A partir deste momento, o modelo passou a ser o cenário base de comparação para todos os outros cenários / experiências que foram simuladas posteriormente.

Este modelo base resultou assim no *layout* apresentado na Figura 36:

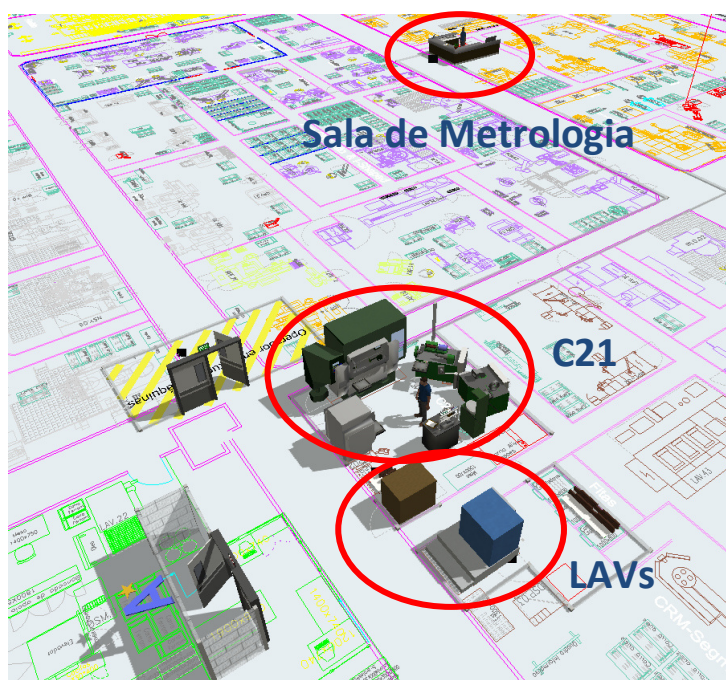


Figura 36 – *Layout* modelo FlexSim - Outubro 2018

### 6.4.3 Cenários simulados

No âmbito do estudo da melhoria da capacidade da Célula 21, foram estudados diversos cenários através do FlexSim, que posteriormente foram alvo de comparação para que fosse tomada a decisão, por parte da Direcção da MAHLE, de qual o cenário que se adequa melhor à realidade da empresa (Tabela 22).

Tabela 22 – Cenários alvo de simulação

Cenários	
1	Outubro 2018
2	MTP e QDAS
3	Aproximação de máquinas
4	Descarga Automática
5	Aproximação de máquinas + Descarga automática
6	<i>Robot</i> com sopro otimizado
7	<i>Robot</i> com sopro otimizado e descarga automática

Deve-se ter em conta que todos os cenários, à exceção do cenário 1, apresentam o MTP e o QDAS efetivado, pois o cenário 2 passou a ser o cenário atual após a implementação do MTP.

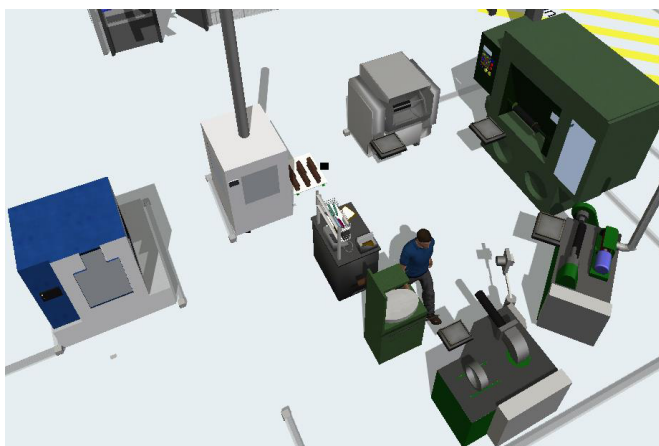
Para cada um dos cenários foram estudadas duas vertentes: uma vertente em que o operador da Célula 21 faz as lavagens das bobinas e uma segunda vertente em que um operador exterior à Célula 21 faz esta operação. Estas alternativas foram estudadas para ter certeza de que este posto de trabalho pode, de facto, fazer face à procura dos clientes.

No fim do estudo de todos estes cenários, foi realizada uma comparação entre eles. Para esta comparação, foram realizadas 20 experiências de cada cenário, de onde se obtiveram as médias, os desvios padrão e os intervalos de confiança para cada um dos cenários (ver Anexos B e C).

#### *Cenário 1 - Outubro de 2018*

Este cenário foi considerado o ponto de partida de todo este estudo, pois todos os outros modelos foram desenvolvidos a partir deste, garantindo que estes apresentavam as mesmas características. Por conseguinte, também foram feitas as comparações necessárias para se chegar ao melhor compromisso de investimento para aumento da capacidade de produção.

O estudo deste cenário (Figura 37) apresentou algumas barreiras relativas ao fluxo de trabalho dos operadores, pois estes apresentavam diferentes métodos de trabalho que mostraram não ser indicados, tal como se explicou anteriormente. Para ultrapassar este obstáculo, decidiu-se fazer um fluxo aproximado daqueles que seriam os métodos de cada operador.



**Figura 37 – Modelo FlexSim – Cenário 1**

Na Figura 37, é possível observar os dados que são fornecidos pelo FlexSim para realizar a análise do modelo. Este *software* apresenta um vasto leque de indicadores, contudo apenas foram utilizados aqueles que eram necessários para análise desta célula de trabalho, nomeadamente:

- O *output* de bobinas detalhado pela respetiva OPA;
- A distância percorrida pelo operador;
- O *Pie Chart* da utilização da máquina CSG-01;
- O *Pie Chart* da utilização do operador;
- O *output* de bobinas por hora;
- O gráfico de *Gantt* da máquina CSG-01 (processo de corte, máquina gargalo);
- O gráfico de *Gantt* de cada uma das bobinas;
- O gráfico de *Gantt* do operador.

Estes indicadores fornecidos pelo FlexSim (Figura 38) mostraram ser essenciais para a análise comparativa entre os diferentes cenários. Só assim, foi possível determinar com algum rigor o impacto dos diferentes cenários da Célula 21.



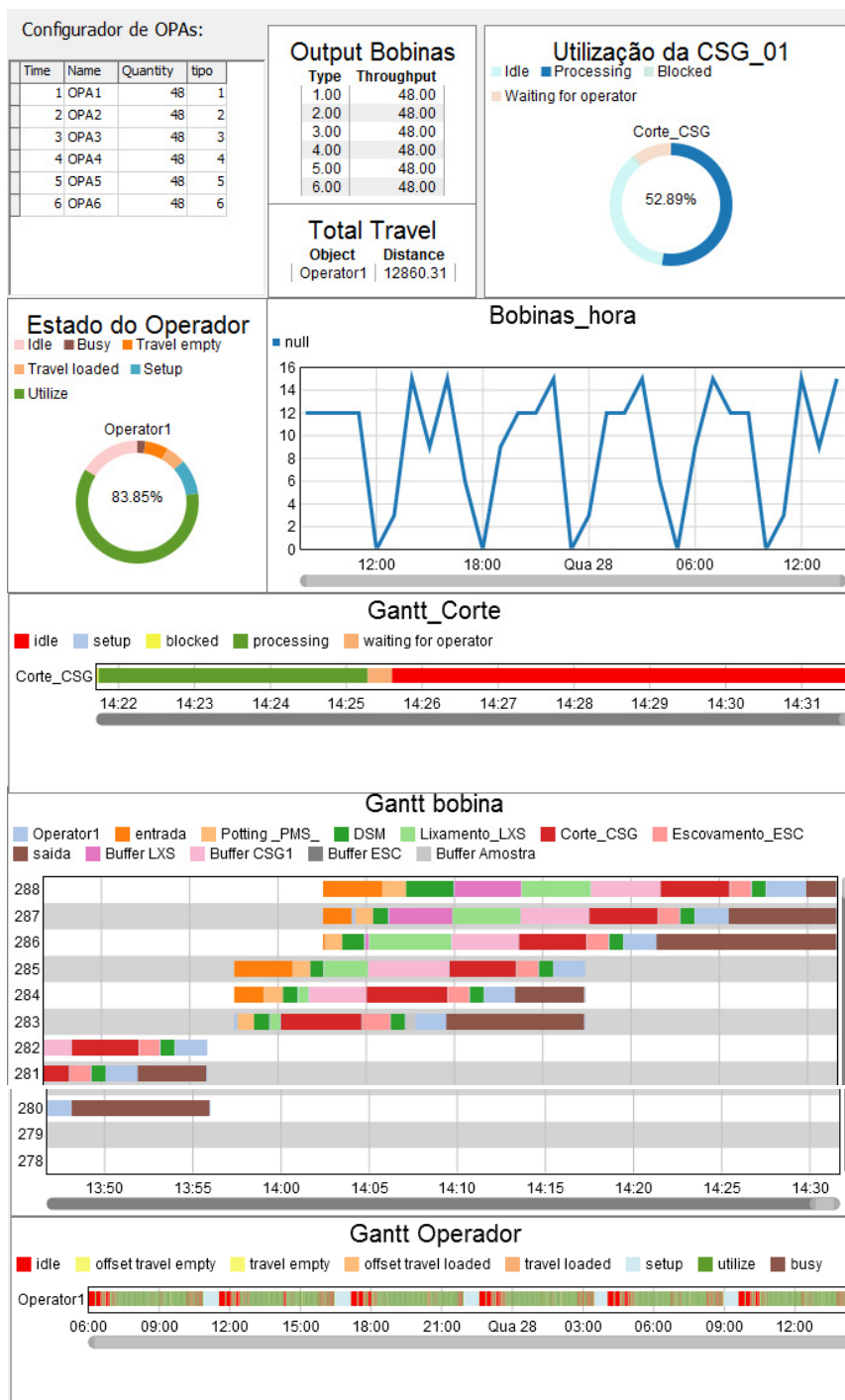


Figura 38 – Dados fornecidos pelo FlexSim – Cenário 1

### *Cenário 2 – Implementação do MTP e do QDAS*

Neste cenário duas melhorias foram implementadas: o Método Padronizado de Trabalho (MTP), que trouxe uma maior organização do método de trabalho por parte de todos os operadores; o QDAS que, além de ter desmaterializado o processo de medição da folga, ainda diminui o tempo deste processo, em cerca de 0,45 minutos uma vez que o registo destas medições passou a ser feito em computador com auxílio de um teclado numérico, de fácil utilização. Passando assim de um processo que tinha a duração de LogNormal2(1,46; 0,114; 0,0709) para LogNormal2(1,01; 0,359; 0,242).

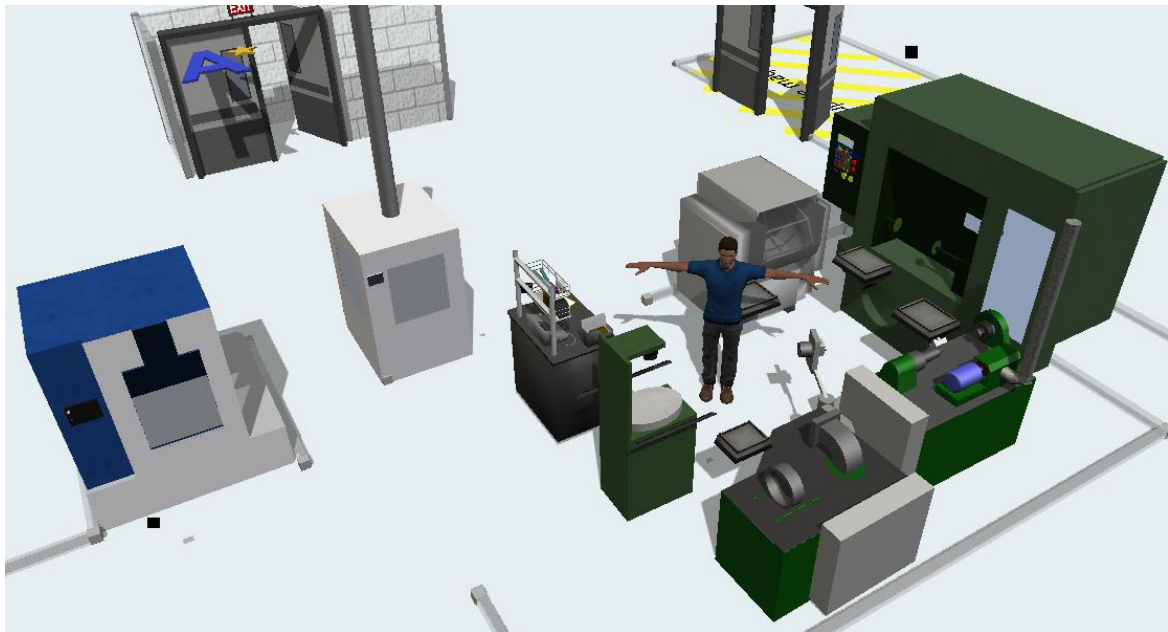
Para o cenário 2, o *layout* é exatamente igual ao do cenário 1, sendo que este acabou por se tornar o cenário base dado que estas melhorias acabaram por ser implementadas alterando a forma de funcionamento da C21.

### *Cenário 3 – Aproximação de máquinas*

Relativamente a este cenário, foi realizada uma aproximação de máquinas, com vista a reduzir a distância percorrida pelos operadores e assim diminuir o seu desgaste e consequentemente aumentar a produção.

Em forma de comparação, o FlexSim informou que com esta aproximação de máquinas o operador passaria a percorrer menos 22,8% da distância relativa ao cenário 2, passando assim de 13085,621 metros para 10100,214 metros na produção de 6 OPAs (288 bobinas).

Este *layout* pode ser observado na Figura 39



**Figura 39 – Layout cenário 3 – Aproximação de máquinas**



#### *Cenário 4 – Dispositivo de descarga automática*

O cenário 4 apresenta a sugestão do desenvolvimento de um sistema de descarga automática que seria aplicado nas máquinas LXS-02, CSG-01 e ESC-09. Este sistema tornaria o fluxo de trabalho mais simplificado, levando à diminuição da distância percorrida pelo operador, assim como à redução do número de levantamento das árvores e diminuição do tempo de ciclo do tempo de ciclo quando comparado com o cenário 2.

Comparativamente ao cenário 2, obtém-se uma melhoria de 5,96% na distância percorrida pelo operador e um aumento de *output* de 0,275 bobinas por hora.

A grande desvantagem deste sistema é apenas o custo envolvido para o desenvolvimento e implementação deste sistema.

O *layout* deste modelo é exatamente igual ao do cenário 2 (Figura 37).

#### *Cenário 5 – Aproximação de máquina e descarga automática*

Para este cenário foi aplicada a aproximação de máquinas, assim como o sistema de descarga automático para, desta forma, para tentar alcançar o maior *output* possível.

Através desta combinação de sugestões, foi possível obter um aumento de *output* de 0,35 bobinas por hora quando comparado com o cenário 2, o que representa mais 966.000 segmentos produzidos ao fim de um ano. Comparativamente ao cenário 4 (Descarga Automática), a distância percorrida pelo operador reduziu em cerca de 1200 metros na produção de 6 OPAs, ou seja, menos 9,57%.

O *layout* deste modelo é exatamente igual ao do cenário 3 (Figura 39).

#### *Cenário 6 – Robot + Operador*

Este é o cenário de maior interesse para os decisores e equipa envolvida neste projeto, pois seria aquele que, à partida, poderia ter mais impacto no *output* e ergonomia da Célula 21. Uma vantagem deste cenário é que o *robot* reduz diretamente o tempo de ocupação do operador e por esse mesmo motivo, este deixa de ser o gargalo da Célula 21, assim sendo o tempo de processamento da máquina gargalo (CSG-01), pode e deve ser encurtado. Assim, optou-se por inserir uma válvula de líquido refrigerador e sopro de ar num só canal para que a duração da parte final deste processo fosse reduzida, isto porque foi observado que o canal do líquido refrigerador não conseguia estancar o refrigerante enquanto o sistema de sopro estava em ação, originando uma limpeza ineficiente da bobina. Assim, através desta válvula, o líquido era imediatamente expelido no momento do sopro, deixando assim o canal livre de qualquer fluído. Desta forma,

obtém-se uma bobina mais limpa e de forma mais rápida, passando de um tempo de processamento da CSG-01 de 3,55 minutos para 3,25 minutos.

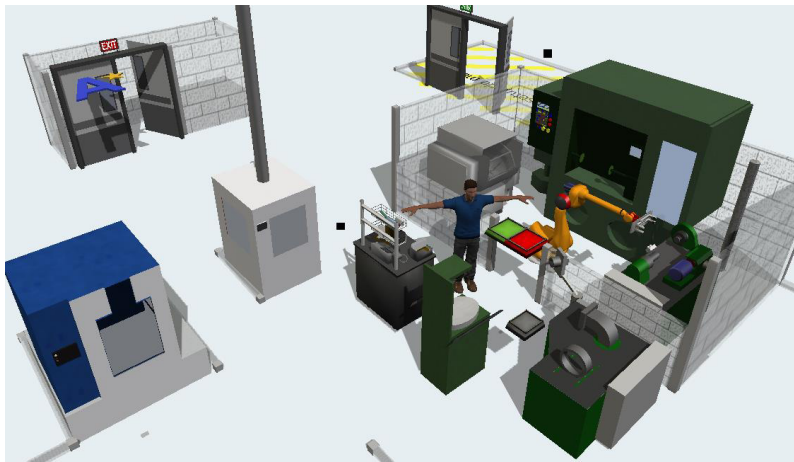


Figura 40 – Layout Cenário 6 – Robot + Operador

Através do FlexSim foi possível modelar este novo cenário através de um novo *layout* e introdução de um *robot*, assim como de um *batch* de entrada e outro de saída da jaula do *robot*. Este passou a ficar encarregue do processo de transporte das bobinas entre 5 estações (Figura 40). Para além dos dois *batches* ficou também responsável pela máquina de lixamento (LXS-02), corte (CSG-01) e escovamento (ESC-09), dando desta forma auxílio ao operador visto que reduz a distância percorrida pelo mesmo, reduz ainda o número de levantamentos do ferramental que passa de 9 vezes por ciclo para 4 vezes por ciclo, ou seja, o operador passa a fazer menos de 50% dos levantamentos a cada turno. Tendo em conta que este ferramental pesa entre 6 a 9 kg, o impacto ergonómico da implementação do *robot* será muito importante para o desgaste a médio / longo prazo dos operadores. Sabemos que, por dia, cada operador faz em média cerca de 548 levantamentos deste ferramental e com a aplicação do *robot*, passará para menos de 244 levantamentos por turno. A somar a este facto ergonómico, deve ter-se em conta que o operador passará assim a percorrer apenas 56% da distância percorrida no cenário de Outubro de 2018.

Estes dois fatores agregados, levam a que o operador possa estar mais relaxado durante o seu trabalho, sem que a produção seja afetada sendo que, pelo contrário, a produção aumenta com um esforço menor por parte do operador. A longo prazo, a implementação do *robot* permitirá aos operadores ter um nível de saúde mais estável e duradouro.

Observou-se que um dos operadores, com 35 anos de idade, responsável por esta célula há 5 anos, já apresenta problemas a nível da coluna vertebral.

#### *Cenário 7 – Robot + Descarga automática + Operador*

A única diferença deste cenário para o cenário 6 é que o tempo de ciclo dedicado ao *robot* iria ser ligeiramente mais rápido devido ao sistema de descarga automática.

## 6.5 Carga de trabalho dedicada à Mini-Célula Pré-PVD

Para que seja possível estimar qual o tempo de trabalho dedicado pelos operadores a esta Mini-Célula, foi realizado um estudo de forma a que seja possível para o supervisor fazer um balanço de operadores consoante a carga de anéis PVD em determinado ano.

Para isso, começou por se observar o tempo de ciclo agregado ao processo Pré-PVD, visível na Tabela 11.

De seguida, tendo em conta a percentagem de anéis PVD para os respetivos anos, foram calculadas as necessidades, em termos de mão-de-obra, desta Mini-Célula para que seja possível fazer uma previsão do balanceamento dos operadores por parte do Supervisor da Sub-Linha do “3 Peças” relativas a cada ano (Tabela 23).

**Tabela 23 – Necessidade de trabalho exigida pela Mini-Célula Pré-PVD**

Necessidades de Célula Pré-PVD					
		2019	2020	2021	2023
Procura		18 659 673	20 293 604	22 252 484	25 987 913
PVD %		16%	21%	30%	64%
PVD Quant.		2 960 800	4 260 400	6 653 160	16 706 770
qtd por turno		4 291	6 174	9 642	24 213
		2019	2020	2021	2023
Necessidades Pré-PVD	min/turno	26	37	58	145
	horas/turno	0,4	0,6	1,0	2,4
Necessidades LAVs	nº de LAVs	9,0	9,8	10,7	12,6
	min/turno	45	49	54	63
	horas/turno	0,8	0,8	0,9	1,0

Necessidade por turno em horas					
2019	2020	2021	2022	2023	
1,2	1,4	1,9	2,7	3,5	horas

Assim sendo, observou-se que em 2019 a Mini-Célula Pré-PVD necessita de ter um operador encarregue da mesma durante 1,2 horas por turno, 1,4 horas em 2020, 1,9 horas em 2021, 2,7 horas em 2022 e finalmente, 3,5 horas por turno em 2023. Ou seja, na pior das hipóteses será necessário meio operador para realizar este processo imprescindível para a produção do anel. Deve-se ter em conta que este processo pode também ser melhorado, levando a uma redução do tempo de ciclo e por conseguinte à diminuição das necessidades associadas a esta Mini-Célula.

## 6.6 Mudança de *layout* para melhoria do *output* da Célula 21

Para estudar possíveis *layouts* com o fim de diminuir o tempo de *setup* e a distância percorrida pelo operador ao longo de cada ciclo, recorreu-se também ao *software* FlexSim. Este *software* é uma importante ajuda porque permite tomar decisões com bastante mais confiança, visto que este nos dá resultados diversos relativos aos diferentes cenários.

Para as comparações das diferentes opções de *layout* foram tidos em conta os seguintes indicadores: *output* por hora, distância percorrida pelo operador e área ocupada. O último indicador também é um aspeto importante, uma vez que o chão de fábrica da MAHLE se encontra lotado e por isso, é necessário proceder à diminuição das áreas de trabalho, para permitir a introdução de novas máquinas na fábrica.

Após uma breve análise no *software* de simulação de processos FlexSim, foi observado qual o melhor método de trabalho que podia ser implementado nesta área de trabalho. Foi possível aumentar a produtividade em 0,4 bobinas hora, o que ao fim de 1 ano é o equivalente a produzir mais 1656 bobinas, isto é, 828.000 segmentos e, ainda diminuir o número de passos dados pelo operador, melhorando assim, a ergonomia de trabalho desta célula de trabalho. Para acrescentar a estes factos, conseguiu-se obter uma redução de área ocupada de 4,1 m<sup>2</sup>.

De forma a validar este novo *layout*, tanto o modelo atual como o modelo com o *layout* sugerido foram apresentados ao Supervisor da Sub-Linha “Anel 3 peças” e ao Coordenador de Projeto e também Engenheiro de Métodos e Tempos, de forma a aprovarem o método de trabalho simulado.

De seguida, são apresentados os resultados obtidos para o estudo do novo *layout* (Figura 41):

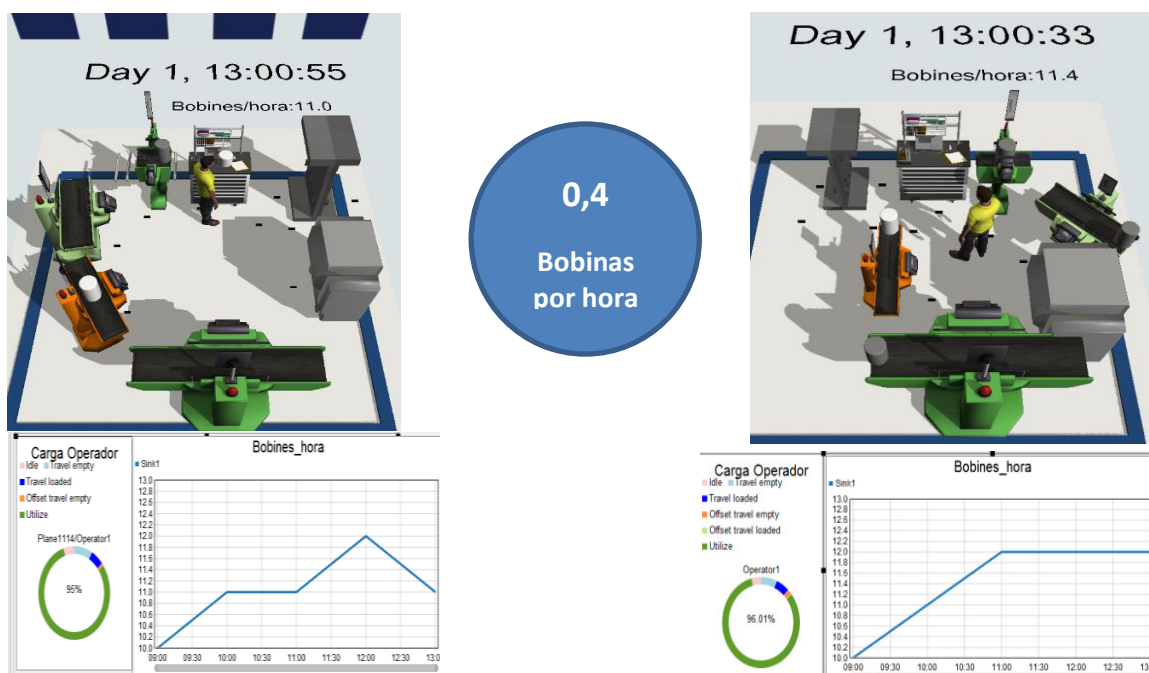


Figura 41 – Esquema comparativo de dois cenários para o estudo do *layout*

A grande diferença deste *layout* está na posição da máquina DSM-04 que foi alterada para o lado direito, de forma a criar um fluxo mais simplificado do processo e ainda a aproximação das máquinas para reduzir a distância percorrida pelo operador. Também as máquinas de lavar (LAV 35 e LAV 42) foram colocadas de forma a facilitar a carga e descarga das bobinas no processo de lavagem.

A proposta de *layout* foi a seguinte (Figura 42):

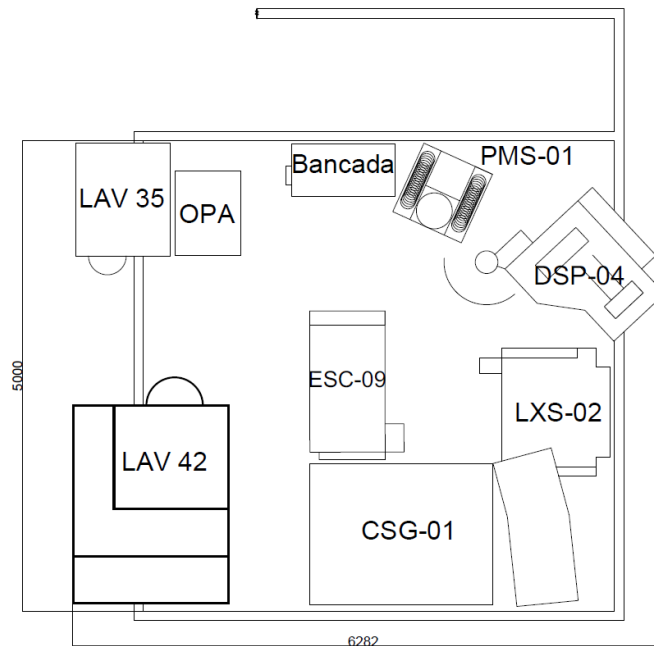


Figura 42 – Desenho de *layout* sugerido através do FlexSim

Através do FlexSim, a aprovação deste *layout* foi simplificada e menos demorada, isto porque este *software* dá resultados bastante próximos da realidade, permitindo antever que a implementação do *layout* acarretará melhorias quando comparado com o atual.

Para implementar este *layout*, terão de ser feitas apenas duas alterações: mudança do *display* de controlo da LXS-02 do lado direito para o lado esquerdo; e colocação de rodas apropriadas na máquina ESC-09, para que seja facilitada a manutenção da mesma.

## 7. Discussão

Um dos aspetos mais difíceis deste estudo foi sem dúvida a complexidade produtiva da Célula 21 que mostrou ser bastante imprevisível e, para piorar a situação, esta mostrava ter pouca ou nenhuma organização ao nível de fluxo produtivo, isto porque todos os operadores responsáveis tinham um método e fluxo de trabalho diferente. Este aspeto, obrigou à rápida implementação de um MTP para que se obtivesse uma célula de trabalho mais organizada e com um método operativo mais fluído.

Um outro ponto que foi considerado muito limitativo foi, sem dúvida, a resistência à mudança por parte dos operadores veteranos. No entanto, após várias semanas de apoio à implementação do MTP, foi possível atingir resultados bastantes satisfatórios, ou seja, todos os operadores trabalhavam de forma igual e metodológica, melhorando assim os tempos de ciclo.

O último ponto, foi talvez o mais desafiante, isto porque foi a primeira vez que se teve contacto com um programa de simulação de processos, sendo que, neste caso, está em causa um projeto de enorme importância para a empresa e, por esse mesmo motivo, a pressão para alcançar resultados positivos era grande. Foram necessários cerca de 2 meses para a conclusão daquele que foi o cenário de partida (Cenário 1), que foi inteiramente desenvolvido a partir do *Process Flow*, que é na verdade, um recurso que permite fazer a programação de todos os pequenos detalhes relativos à simulação de forma a alcançar um modelo virtual o mais próximo possível da realidade.

Após correr todos os modelos do FlexSim, chegou-se a uma tabela comparativa que faz referências a vários aspetos importantes relativos ao *output* e ergonomia do posto de trabalho (Tabela 24).

**Tabela 24 – Output fornecido pelo FlexSim para cada um dos cenários, contemplando lavagens**

Produção de 6 OPAs (288 bobinas = 144.000 anéis )								
	Bobinas produzidas	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Duração real (6 OPAs) [h]	Capacidade Anual real [pcs] (230 dias)	Capacidade diária real [pcs por dia]	Aumento Capacidade
1	288	12 900	54	84	37,9	19 651 899	82 764	-
2		13 100	56	84	36,5	20 427 632	86 031	4%
3		10 100	57	83	36,0	20 700 000	87 179	5%
4		12 300	57	83	35,8	20 838 926	87 764	6%
5		11 100	58	82	35,5	20 979 730	88 357	6%
6		7 300	56	81	33,6	22 189 578	93 452	11%
7		7 300	58	83	32,9	22 664 234	95 451	13%

Ao realizar uma análise destes resultados, observa-se que, mesmo nas melhores condições de trabalho, como é exemplo o cenário 7, a Célula 21 não será suficiente para fazer face ao aumento da procura de segmentos de 3 peças.

Adicionalmente, após estudos de simulação deve ser feita uma correta observação e comparação dos resultados obtidos. Por exemplo, deve-se ter em conta a fadiga do operador e o que acontece nos modelos 1 a 5 é que o operador trabalha quase como uma máquina e apenas faz as paragens delineadas inicialmente, de 15 minutos cada uma. Ou seja, para uma correta comparação deve ter-se em conta uma diminuição dos valores do *output* fornecidos pelo sistema na ordem dos 5-10%, dado que, nesses cenários, o próprio operador é o gargalo da Célula 21 e, assim sendo, qualquer pausa ou diminuição do ritmo de trabalho devido a fadiga deve ser tida em conta. Ou seja, após fazer o balanceamento dos resultados, os valores finais obtidos são os apresentados na Tabela 25.

**Tabela 25 – Output fornecido pelo FlexSim para cada um dos cenários com tratamento de dados, não contemplando lavagens**

Produção de 6 OPAs (288 bobinas = 144.000 anéis )								
	Bobinas produzidas	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Duração (6 OPAs) [h]	Capacidade Anual (230 dias) [pcs]	Capacidade diária [pcs por dia]	Aumento Capacidade
1	288	12 900	49	79	39,8	18 716 094	81 374	-
2		13 100	51	79	38,3	19 454 887	84 586	4%
3		10 100	52	78	37,8	19 714 286	85 714	5%
4		12 300	52	77	37,5	19 846 596	86 290	6%
5		11 100	53	76	37,3	19 980 695	86 873	6%
6		7 300	61	76	31,9	23 357 451	101 554	20%
7		7 300	63	78	31,2	23 857 088	103 726	22%

Assim sendo, considerando o cenário 6, que é aquele que parece ser mais viável uma vez que não acarreta os custos de aplicação dos sistemas de descarga automática no valor de 45.000€, observa-se um aumento da produção de 20%, ou seja quase 23,5 milhões de unidades produzidas. Contudo, e sabendo que estes modelos são meras simulações, uma outra análise deve ser feita. Uma vez que o output real de 2018 foi de 18.990.073 unidades com uma taxa de anéis PVD muito baixa, todos os valores de *output* tiveram de ser sujeitos a um fator que permitisse realizar uma análise mais clara e direta, passando assim a tomar os valores seguintes:

- 1 – 18.990.073
- 2 – 19.739.681
- 3 – 20.002.877
- 4 – 20.137.125
- 5 – 20.273.186
- 6 – 23.699.373
- 7 – 24.206.325

Após este detalhe, observa-se que após a aplicação do *robot*, assim como do *upgrade* do sistema de sopro da CSG-01 e da Mini-Célula Pré-PVD, é possível satisfazer a procura até 2022, inclusive, mesmo com o operador a fazer as lavagens (Tabela 26). Contudo, para que não seja necessário deslocar um operador de outro posto de trabalho, o operador encarregue da Mini-Célula Pré-PVD ficaria encarregue de fazer a lavagem apenas a partir de 2023.

Tabela 26 – Output fornecido pelo FlexSim para o cenário 6, rejeitando as lavagens

Produção de 6 OPAs - SEM LAVAR								
	Bobinas produzidas	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Duração (6 OPAs) [h]	Capacidade Anual (230 dias) [pcs]	Capacidade diária [pcs por dia]	Aumento Capacidade
6	288	4 800	76	78	28,0	26 961 516	117 224	13,4

Pode ser concluído que, ao passar a tarefa de lavagem para o operador da Mini-Célula Pré-PVD, o aumento de capacidade aumentará cerca de 13,4% (quando comparado com o cenário 6, COM Lavagem), fazendo com que a procura seja satisfeita até 2023. As duas grandes diferenças deste cenário “Sem Lavar” é que a distância percorrida diminui de 7300 para 4800 metros (35% menos) e há uma subida da taxa de ocupação da CSG-01 para 76%, ou seja mais 15% quando comparado com o cenário com lavagem incluída. Isto iria ter impacto direto no aumento do OEU da Célula 21.

Assim sendo a proposta de investimento final com base nos dados fornecidos pelo FlexSim foi a seguinte (Tabela 27, Figura 43 e Figura 44):

Tabela 27 – Proposta de investimento com base no FlexSim

Proposta de investimento					
Início Projeto	Investimento	Previsão de custo	Início de produção	Procura satisfeita até	Dias de trabalho por ano
2019	Robot + Aplicação < 1,5 Operadores	50 000 €	Janeiro 2020	Dezembro 2021	230
	Blow/cooling valves	1 000 €			
2020	Máquina PMS	Mini-Célula Pré-PVD 100.000 €	Janeiro 2021	Dezembro 2023	270
	Máquina ESC		Total: 151.000 €		
	Chave de aperto elétrico e suporte				



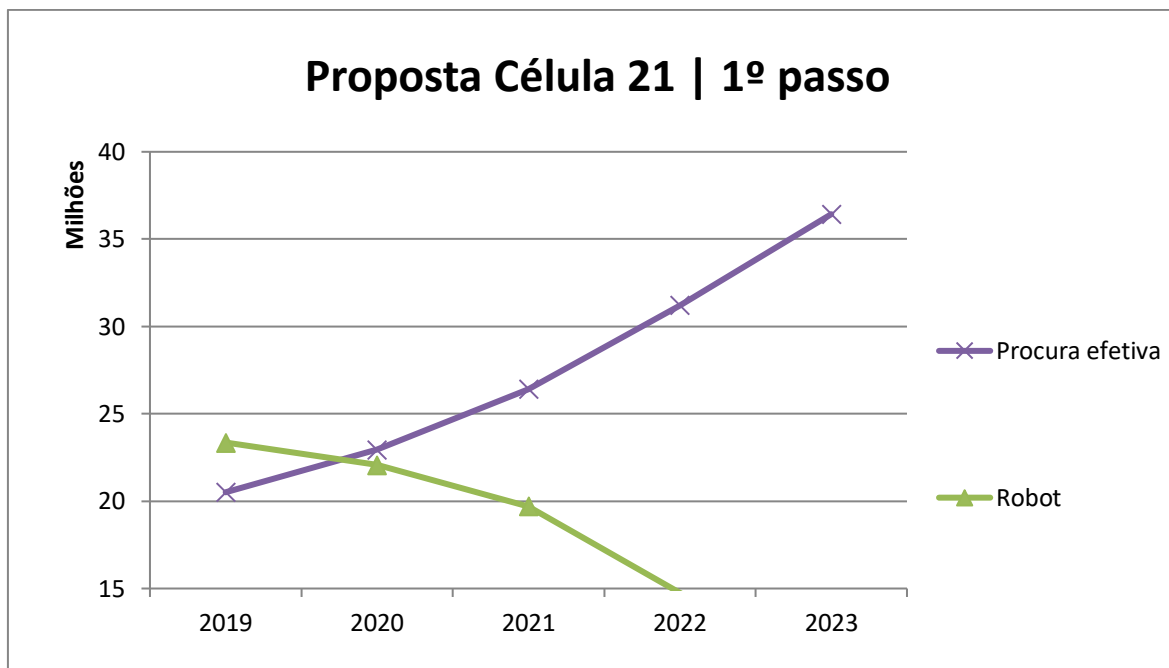


Figura 43 – 1º passo da proposta de investimento | Robot

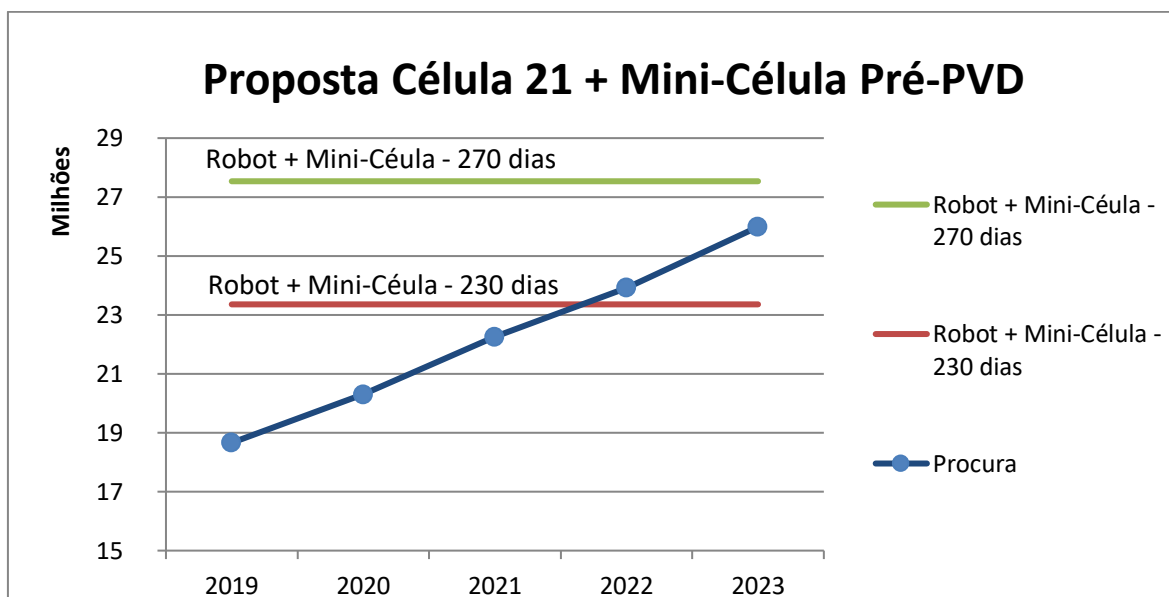






Figura 44 – 2º passo da proposta de investimento | Mini-Célula Pré PVD

Estes resultados são discutidos e comparados no tópico 8.

## 8. Conclusões

Como conclusão essencial deste projeto, é feita uma comparação de *outputs* entre os resultados obtidos a partir do estudo teórico e do estudo de simulação realizado através do FlexSim, de forma a concluir se ambos os métodos são concordantes.

Tabela 28 – Comparação dos *outputs* fornecidos pelos diferentes métodos de estudo

Ano 2023	Capacidade produtiva satisfeita	
	Analítico	FlexSim
230 dias de trabalho <i>Robot + Mini-Célula Pré-PVD</i>		
270 dias de trabalho <i>Robot + Mini-Célula Pré-PVD</i>		

A conclusão que se pode tirar da Tabela 28 é que, tal como era esperado, os *outputs* fornecidos pelos diferentes métodos foram diferentes. No entanto, as propostas de investimento foram exatamente iguais, tirando o facto de que, através do FlexSim, seria necessário produzir em horário extra, ou seja mais do que 230 dias, a partir de 2022, o que não sucedia com o estudo analítico. A interpretação que se pode fazer deste resultado é que, caso não fosse realizado o estudo de simulação, muito provavelmente a capacidade produtiva do investimento realizado não atingiria as expectativas tal como acontece em muitos casos.

Através do FlexSim, foi também possível quantificar a redução na distância percorrida pelo operador, o que de forma analítica seria um pouco mais complicado de perceber de forma concreta, uma vez que este operador realiza outras operações além daquelas relativas às máquinas PMS-04, DSM-04, LXS-02, CSG-01, ESC-09 e à bancada. Foi assim admissível quantificar e demonstrar à Direcção, de forma mais assertiva, qual seria o ganho em termos ergonómicos para os operadores da Célula 21. Esta distância poderá ser reduzida em 44%, sendo que o número de levantamentos do ferramental é reduzido em mais de 50%. Estes fatores foram suficientes para que a implementação deste projeto tenha sido aprovada e seja realizada num futuro próximo.

Ao longo deste estudo de simulação houve um detalhe que demonstrou ser de extrema importância. Inicialmente foi partilhada a informação com os operadores de que deveria ser dada prioridade à máquina CSG-01, visto ser esta a máquina gargalo. No entanto o *software* veio demonstrar que o gargalo da Célula 21 era o operador e, por essa mesma razão, o MTP implementado foi realizado a pensar na melhoria e organização do fluxo do processo, ou seja,

começou a ser dada prioridade à tarefa presente e não à máquina gargalo, o que permitiu diminuir o tempo de ciclo do processo.

A partir dos resultados obtidos pelo FlexSim, será esperado que, após a implementação do *robot* na Célula 21 e da Mini-Célula Pré-PVD, esta deixe de ser o gargalo passando a operar com um OEU que ronda os 75 a 80%, o que vai de encontro à política interna do Grupo MAHLE que indica que qualquer máquina deve apresentar um OEU superior a 80%. Este dado sugere assim, que seja feito um outro estudo para o aumento de capacidade da enroladora que, de momento, já apresenta um OEU bastante elevado (mais de 90%).

Este projeto contribuiu assim para a melhor compreensão do mundo fabril no sector automóvel, sendo que as maiores dificuldades foram ao nível da resistência à mudança por parte da maioria dos operadores. No final, porém, a dita mudança, mostrou ser uma mais valia, tanto para a empresa como para os operadores a nível de desgaste físico. Graças a este estudo, foi possível perceber a importância de conseguir manter uma boa relação profissional / pessoal com os operadores, sem a qual a implementação do MTP não teria sido possível. É de notar que a postura dos trabalhadores é um fator crítico e que, caso estes não estejam recetivos à mudança, a probabilidade de determinado projeto ser um fracasso é elevada.

## Referências Bibliográficas

- Altioik, T., & Melamed, B. (2010). *Simulation Modeling and Analysis with ARENA*. Academic Press (1st ed.). Elsevier.
- ARENA. (2004). *ARENA User's Guide*. ROCKWELL SOFTWARE. Retrieved from [https://studerende.au.dk/fileadmin/www.asb.dk/servicekatalog/IT/Analysevaerktoejer/Arena/Arena\\_User\\_s\\_Guide\\_EN.pdf](https://studerende.au.dk/fileadmin/www.asb.dk/servicekatalog/IT/Analysevaerktoejer/Arena/Arena_User_s_Guide_EN.pdf)
- Banks, J. (2005). Discrete event simulation. *Resonance*, 7–13. <https://doi.org/10.1007/s12045-013-0010-x>
- Fishman, G. S., & Jaramillo, J. D. L. (2001). Discrete-Event Simulation : Modeling , Programming , and Analysis A Detailed View of the Book, 1–5.
- FlexSim. (n.d.). *Cálculo do número de replicações necessárias*.
- FlexSim. (2017). *FlexSim User Manual*. FlexSim. [https://doi.org/10.1007/SpringerReference\\_28001](https://doi.org/10.1007/SpringerReference_28001)
- Law, A. M., & Kelton, W. D. (1991). *Simulation modeling and analysis*. McGraw-Hill International Education (Vol. 2). <https://doi.org/10.1145/1667072.1667074>
- Lourenço, V. (2015). *Tecnologia de fabricação de segmentos* (No. MFP-04).
- Mourtzis, D., Doukas, M., & Bernidaki, D. (2014). Simulation in manufacturing: Review and challenges. *Procedia CIRP*, 25(C), 213–229. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.032>
- Murillo Illanes, M. (2010). *Manual Técnico*. Manual Técnico - Curso MAHLE metal leve - Motores de Combustão Interna. MAHLE.
- Ramos, A. (2005). *Conceitos básicos de simulação*.
- Robert, S. (1998). Introduction to the Art and Science of Simulation. *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*, 1–30. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Sakurada, N., & Miyake, D. I. (2010). Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços. *Gestão & Produção*, 16(1), 25–43. <https://doi.org/10.1590/s0104-530x2009000100004>
- Sharma, P. (2015). Discrete-Event Simulation with ns2. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*, 4(04), 1–5.



## Anexos

### ANEXO A – Tabela da distribuição T-Student

	$\alpha$					
Graus de Liberdade	0,005	0,010	0,025	0,050	0,100	0,250
1	63,657	31,821	12,706	6,314	3,078	1,000
2	9,925	6,965	4,303	2,920	1,886	0,816
3	5,841	4,541	3,182	2,353	1,638	0,765
4	4,604	3,747	2,776	2,132	1,533	0,741
5	4,032	3,365	2,571	2,015	1,476	0,727
6	3,707	3,143	2,447	1,943	1,440	0,718
7	3,499	2,998	2,365	1,895	1,415	0,711
8	3,355	2,896	2,306	1,860	1,397	0,706
9	3,250	2,821	2,262	1,833	1,383	0,703
10	3,169	2,764	2,228	1,812	1,372	0,700
11	3,106	2,718	2,201	1,796	1,363	0,697
12	3,055	2,681	2,179	1,782	1,356	0,695
13	3,012	2,650	2,160	1,771	1,350	0,694
14	2,977	2,624	2,145	1,761	1,345	0,692
15	2,947	2,602	2,131	1,753	1,341	0,691
16	2,921	2,583	2,120	1,746	1,337	0,690
17	2,898	2,567	2,110	1,740	1,333	0,689
18	2,878	2,552	2,101	1,734	1,330	0,688
19	2,861	2,539	2,093	1,729	1,328	0,688
20	2,845	2,528	2,086	1,725	1,325	0,687
21	2,831	2,518	2,080	1,721	1,323	0,686
22	2,819	2,508	2,074	1,717	1,321	0,686
23	2,807	2,500	2,069	1,714	1,319	0,685
24	2,797	2,492	2,064	1,711	1,318	0,685
25	2,787	2,485	2,060	1,708	1,316	0,684
26	2,779	2,479	2,056	1,706	1,315	0,684
27	2,771	2,473	2,052	1,703	1,314	0,684
28	2,763	2,467	2,048	1,701	1,313	0,683
29	2,756	2,462	2,045	1,699	1,311	0,683



## ANEXO B – Outputs com operação de lavagem

### Output do cenário 1 com lavagens, fornecido pelo FlexSim

Cenário 1	Bobinas por hora	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Tempo final [hh:mm:ss]	Duração [h]	Capacidade Anual (230 dias)	Capacidade diária (pcs por dia)	Capacidade turno (pcs por turno)
1	8,9	12909,66	53,14	83,99	14:22:44	38,3789	19 416 925	84 421	28 140
2	8,9	12852,57	53,3	83,99	14:17:27	38,2908	19 461 577	84 616	28 205
3	8,9	12869,44	53,1	83,57	14:24:35	38,4097	19 401 338	84 354	28 118
4	9	12927,44	53,62	84,15	14:05:22	38,0894	19 564 475	85 063	28 354
5	8,9	12919,65	53,32	83,77	14:16:05	38,2681	19 473 161	84 666	28 222
6	8,9	12892,85	53,02	83,66	14:26:39	38,4442	19 383 955	84 278	28 093
7	8,9	12877,87	53,33	84,09	14:16:05	38,2681	19 473 161	84 666	28 222
8	8,9	12890,5	52,97	83,39	14:28:45	38,4792	19 366 324	84 201	28 067
9	8,9	12896,07	53,09	83,65	14:24:18	38,4050	19 403 723	84 364	28 121
10	8,9	12881,92	52,99	83,97	14:28:06	38,4683	19 371 778	84 225	28 075
11	9	12887,6	53,55	83,92	14:07:49	38,1303	19 543 524	84 972	28 324
12	8,9	12890,65	53,48	84,48	14:10:48	38,1800	19 518 072	84 861	28 287
13	8,9	12912,36	53,13	84,16	14:23:24	38,3900	19 411 305	84 397	28 132
14	8,8	12908,1	52,84	83,7	14:33:44	38,5622	19 324 612	84 020	28 007
15	8,9	12887,18	53,43	83,68	14:12:24	38,2067	19 504 449	84 802	28 267
16	9	12919,23	53,59	83,92	14:06:15	38,1042	19 556 916	85 030	28 343
17	8,9	12884,8	53,32	83,96	14:16:12	38,2700	19 472 171	84 662	28 221
18	8,9	12906,96	53,16	83,98	14:21:24	38,3567	19 428 174	84 470	28 157
19	9	12859,32	53,57	84,14	14:07:03	38,1175	19 550 075	85 000	28 333
20	8,9	12888,04	53,21	83,99	14:19:45	38,3292	19 442 113	84 531	28 177
AVG	8,915	12893,111	53,258	83,908	0,596	38,307	19453391,532	84579,963	28193,321
STD	0,049	19,883	0,229	0,251	0,006	0,138	70040,705	304,525	101,508
LI	8,894	12884,397	53,158	83,798	0,594	38,247	19422694,840	84446,499	28148,833
LS	8,936	12901,824	53,358	84,018	0,599	38,368	19484088,225	84713,427	28237,809
Amplitude	0,043	17,428	0,201	0,220	0,005	0,121	61393,385	266,928	88,976



Output do cenário 2 com lavagens, fornecido pelo FlexSim

Cenário 2	Bobinas por hora	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Tempo final [hh:mm:ss]	Duração [h]	Capacidade Anual (230 dias)	Capacidade diária (pcs por dia)	Capacidade turno (pcs por turno)
1	9,3	13104,48	55,31	84,13	12:48:32	36,8089	20 245 110	88 022	29 341
2	9,3	13076,87	55,09	83,72	12:55:46	36,9294	20 179 020	87 735	29 245
3	9,4	13091,46	55,54	83,97	12:43:53	36,7314	20 287 825	88 208	29 403
4	9,4	13097,34	55,61	83,92	12:38:28	36,6411	20 337 811	88 425	29 475
5	9,3	13078,71	55,31	83,86	12:48:34	36,8094	20 244 804	88 021	29 340
6	9,4	13092,79	55,45	84,03	12:43:48	36,7300	20 288 592	88 211	29 404
7	9,4	13100,55	55,57	84	12:39:41	36,6614	20 326 562	88 376	29 459
8	9,3	13087,32	55,3	83,94	12:48:49	36,8136	20 242 513	88 011	29 337
9	9,3	13103,38	54,9	83,99	13:02:13	37,0369	20 120 450	87 480	29 160
10	9,3	13097,1	55,1	83,95	12:55:38	36,9272	20 180 234	87 740	29 247
11	9,3	13084,58	55,2	83,85	12:52:11	36,8697	20 211 706	87 877	29 292
12	9,3	13053,58	55,16	83,62	12:53:32	36,8922	20 199 380	87 823	29 274
13	9,3	13059,17	55,24	83,68	12:50:45	36,8458	20 224 811	87 934	29 311
14	9,3	13080,23	55,31	83,77	12:48:29	36,8081	20 245 568	88 024	29 341
15	9,3	13065,26	55,09	83,99	12:55:58	36,9328	20 177 199	87 727	29 242
16	9,4	13109,67	55,39	83,93	12:45:59	36,7664	20 268 512	88 124	29 375
17	9,3	13083,11	55,27	83,79	12:49:47	36,8297	20 233 658	87 972	29 324
18	9,4	13106,96	55,45	84,12	12:43:56	36,7322	20 287 365	88 206	29 402
19	9,4	13092,36	55,64	83,76	12:37:31	36,6253	20 346 603	88 463	29 488
20	9,3	13047,5	55,38	83,67	12:46:19	36,7719	20 265 450	88 111	29 370
AVG	9,335	13085,621	55,316	83,885	0,534	36,808	20245658,747	88024,603	29341,534
STD	0,049	17,896	0,195	0,148	0,004	0,106	58251,297	253,267	84,422
LI	9,314	13077,778	55,230	83,820	0,532	36,762	20220128,991	87913,604	29304,535
LS	9,356	13093,464	55,401	83,949	0,536	36,855	20271188,504	88135,602	29378,534
Amplitude	0,043	15,687	0,171	0,129	0,004	0,093	51059,513	221,998	73,999

Output do cenário 3 com lavagens, fornecido pelo FlexSim

Cenário 3	Bobinas por hora	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Tempo final [hh:mm:ss]	Duração [h]	Capacidade Anual (230 dias)	Capacidade diária (pcs por dia)	Capacidade turno (pcs por turno)
1	9,6	10109,23	56,83	82,37	11:58:55	35,9819	20 710 387	90 045	30 015
2	9,5	10098,15	56,1	82,57	12:22:36	36,3767	20 485 659	89 068	29 689
3	9,5	10091,31	56,47	82,31	12:10:35	36,1764	20 599 071	89 561	29 854
4	9,6	10098,54	56,3	82,59	12:15:54	36,2650	20 548 738	89 342	29 781
5	9,5	10085,81	56,25	82,49	12:17:44	36,2956	20 531 439	89 267	29 756
6	9,6	10107,78	56,81	82,48	11:59:40	35,9944	20 703 195	90 014	30 005
7	9,5	10071,96	56,2	82,25	12:19:16	36,3211	20 516 993	89 204	29 735
8	9,5	10115,03	56,46	82,63	12:10:42	36,1783	20 597 964	89 556	29 852
9	9,6	10116,42	56,7	82,68	12:03:14	36,0539	20 669 060	89 865	29 955
10	9,5	10097,5	56,39	82,51	12:12:55	36,2153	20 576 951	89 465	29 822
11	9,5	10108,31	56,42	82,78	12:12:14	36,2039	20 583 424	89 493	29 831
12	9,5	10099,09	56,5	82,45	12:09:33	36,1592	20 608 882	89 604	29 868
13	9,6	10084,71	56,91	82,27	11:56:35	35,9431	20 732 795	90 143	30 048
14	9,6	10083,59	56,7	82,39	12:03:08	36,0522	20 670 016	89 870	29 957
15	9,6	10116,21	56,83	82,54	11:59:12	35,9867	20 707 670	90 033	30 011
16	9,6	10085,5	56,61	82,46	12:06:06	36,1017	20 641 706	89 747	29 916
17	9,6	10106,44	56,55	82,54	12:08:05	36,1347	20 622 824	89 664	29 888
18	9,5	10106,54	56,26	82,51	12:17:09	36,2858	20 536 940	89 291	29 764
19	9,5	10101,08	56,35	82,73	12:14:17	36,2381	20 564 017	89 409	29 803
20	9,5	10121,07	56,35	82,58	12:14:23	36,2397	20 563 072	89 405	29 802
AVG	9,545	10100,214	56,500	82,507	0,507	36,160	20608540,209	89602,349	29867,450
STD	0,051	13,160	0,235	0,143	0,005	0,126	71580,625	311,220	103,740
LI	9,523	10094,446	56,396	82,444	0,504	36,105	20577168,617	89465,951	29821,984
LS	9,567	10105,981	56,603	82,569	0,509	36,215	20639911,801	89738,747	29912,916
Amplitude	0,045	11,535	0,206	0,125	0,005	0,110	62743,184	272,796	90,932

Output do cenário 4 com lavagens, fornecido pelo FlexSim

Cenário 4	Bobinas por hora	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Tempo final [hh:mm:ss]	Duração [h]	Capacidade Anual (230 dias)	Capacidade diária (pcs por dia)	Capacidade turno (pcs por turno)
1	9,7	12337,59	57,2	83,17	11:47:29	35,7914	20 820 651	90 525	30 175
2	9,5	12404,02	56,26	83,47	12:17:07	36,2853	20 537 255	89 292	29 764
3	9,5	12299,81	56,5	83,03	12:09:31	36,1586	20 609 199	89 605	29 868
4	9,7	12242,35	57,33	83,02	11:43:30	35,7250	20 859 342	90 693	30 231
5	9,6	12416,64	56,79	83,29	12:00:14	36,0039	20 697 764	89 990	29 997
6	9,5	12326,37	56,36	83,26	12:14:04	36,2344	20 566 067	89 418	29 806
7	9,7	12242,45	57,3	83,21	11:44:19	35,7386	20 851 398	90 658	30 219
8	9,6	12309,14	57,05	83,3	11:51:59	35,8664	20 777 113	90 335	30 112
9	9,7	12319,51	57,22	83,32	11:46:43	35,7786	20 828 086	90 557	30 186
10	9,6	12205,14	56,99	82,86	11:53:50	35,8972	20 759 266	90 258	30 086
11	9,6	12287,63	56,62	82,99	12:05:43	36,0953	20 645 360	89 762	29 921
12	9,6	12307,32	57,01	82,97	11:53:21	35,8892	20 763 926	90 278	30 093
13	9,6	12283,09	56,75	83,24	12:01:34	36,0261	20 684 997	89 935	29 978
14	9,6	12303,03	57,07	83,26	11:51:29	35,8581	20 781 941	90 356	30 119
15	9,6	12343,97	56,95	83,39	11:55:07	35,9186	20 746 905	90 204	30 068
16	9,7	12390,42	57,18	83,44	11:47:59	35,7997	20 815 804	90 503	30 168
17	9,6	12148,03	56,77	83,03	12:01:05	36,0181	20 689 623	89 955	29 985
18	9,5	12351,51	56,5	83,22	12:09:26	36,1572	20 609 990	89 609	29 870
19	9,6	12271,36	56,64	83,17	12:05:11	36,0864	20 650 445	89 785	29 928
20	9,7	12332,59	57,24	83,18	11:46:10	35,7694	20 833 424	90 580	30 193
AVG	9,610	12306,099	56,887	83,191	0,498	35,955	20726427,788	90114,903	30038,301
STD	0,072	64,941	0,326	0,164	0,007	0,172	98815,973	429,635	143,212
LI	9,579	12277,637	56,744	83,119	0,495	35,880	20683119,778	89926,608	29975,536
LS	9,641	12334,560	57,029	83,263	0,501	36,030	20769735,798	90303,199	30101,066
Amplitude	0,063	56,923	0,286	0,144	0,006	0,151	86616,019	376,591	125,530

Output do cenário 5 com lavagens, fornecido pelo FlexSim

Cenário 5	Bobinas por hora	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Tempo final [hh:mm:ss]	Duração [h]	Capacidade Anual (230 dias)	Capacidade diária (pcs por dia)	Capacidade turno (pcs por turno)
1	9,7	11125,18	57,4	82,34	11:41:08	35,6856	20 882 399	90 793	30 264
2	9,6	11158,99	57,07	82,81	11:51:27	35,8575	20 782 263	90 358	30 119
3	9,7	10952,71	57,24	82,3	11:46:02	35,7672	20 834 718	90 586	30 195
4	9,7	11173,52	57,57	82,66	11:35:59	35,5997	20 932 748	91 012	30 337
5	9,7	11069,94	57,22	82,36	11:46:44	35,7789	20 827 925	90 556	30 185
6	9,6	11187,85	57,08	82,9	11:51:17	35,8547	20 783 873	90 365	30 122
7	9,8	11147,28	57,75	82,72	11:30:18	35,5050	20 988 593	91 255	30 418
8	9,7	11220,97	57,45	82,68	11:39:38	35,6606	20 897 038	90 857	30 286
9	9,7	11149,36	57,48	82,57	11:38:49	35,6469	20 905 018	90 891	30 297
10	9,7	11208,77	57,11	82,62	11:50:14	35,8372	20 794 022	90 409	30 136
11	9,7	11046,85	57,36	82,53	11:42:31	35,7086	20 868 916	90 734	30 245
12	9,8	11167,45	57,83	82,64	11:27:56	35,4656	21 011 936	91 356	30 452
13	9,6	11143,77	57,06	82,74	11:51:44	35,8622	20 779 527	90 346	30 115
14	9,6	11071,09	56,91	82,64	11:56:39	35,9442	20 732 154	90 140	30 047
15	9,7	11127,37	57,16	82,6	11:48:31	35,8086	20 810 637	90 481	30 160
16	9,7	11112,09	57,21	82,71	11:47:05	35,7847	20 824 529	90 541	30 180
17	9,7	11085,1	57,37	82,34	11:41:58	35,6994	20 874 274	90 758	30 253
18	9,6	11183,93	57,07	82,71	11:51:28	35,8578	20 782 102	90 357	30 119
19	9,7	11077,95	57,33	82,4	11:43:17	35,7214	20 861 451	90 702	30 234
20	9,7	11153,03	57,3	82,61	11:44:08	35,7356	20 853 181	90 666	30 222
AVG	9,685	11128,160	57,299	82,594	0,489	35,739	20851365,221	90658,110	30219,370
STD	0,059	63,535	0,237	0,168	0,005	0,123	71853,941	312,408	104,136
LI	9,659	11100,315	57,195	82,521	0,487	35,685	20819873,842	90521,191	30173,730
LS	9,711	11156,005	57,402	82,667	0,491	35,793	20882856,599	90795,029	30265,010
Amplitude	0,051	55,691	0,208	0,147	0,004	0,108	62982,757	273,838	91,279

Output do cenário 6 com lavagens, fornecido pelo FlexSim

Cenário 6	Bobinas por hora	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Tempo final [hh:mm:ss]	Duração [h]	Capacidade Anual (230 dias)	Capacidade diária (pcs por dia)	Capacidade turno (pcs por turno)
1	10,3	7355,03	55,67	81,4	09:49:56	33,8322	22 026 339	95 767	31 922
2	10,4	7345,53	55,99	80,83	09:40:26	33,6739	22 129 906	96 217	32 072
3	10,4	7343,09	55,93	81,12	09:42:12	33,7033	22 110 573	96 133	32 044
4	10,3	7345,47	55,53	81,23	09:54:05	33,9014	21 981 400	95 571	31 857
5	10,4	7359,3	55,81	80,9	09:45:51	33,7642	22 070 736	95 960	31 987
6	10,5	7345,18	56,29	81,06	09:31:36	33,5267	22 227 083	96 639	32 213
7	10,4	7344,83	55,91	81,37	09:42:38	33,7106	22 105 836	96 112	32 037
8	10,3	7340,62	55,55	81,7	09:53:33	33,8925	21 987 165	95 596	31 865
9	10,4	7340,68	56,14	81	09:36:06	33,6017	22 177 471	96 424	32 141
10	10,3	7328,34	55,44	81,31	09:56:46	33,9461	21 952 441	95 445	31 815
11	10,4	7336,76	55,83	81	09:45:12	33,7533	22 077 819	95 991	31 997
12	10,4	7321,96	55,99	81,28	09:40:17	33,6714	22 131 549	96 224	32 075
13	10,3	7333,3	55,34	80,78	09:59:48	33,9967	21 919 796	95 303	31 768
14	10,3	7318,17	55,37	81,32	09:58:42	33,9783	21 931 623	95 355	31 785
15	10,4	7313,68	55,98	80,78	09:40:39	33,6775	22 127 533	96 207	32 069
16	10,4	7338,22	55,82	81,33	09:45:18	33,7550	22 076 729	95 986	31 995
17	10,3	7327,87	55,43	80,91	09:56:55	33,9486	21 950 824	95 438	31 813
18	10,4	7316,69	55,82	80,82	09:45:30	33,7583	22 074 549	95 976	31 992
19	10,4	7336,58	56,18	80,83	09:34:51	33,5808	22 191 230	96 484	32 161
20	10,4	7327,97	55,72	80,74	09:48:21	33,8058	22 043 533	95 841	31 947
AVG	10,370	7335,964	55,787	81,086	0,407	33,774	22064706,871	95933,508	31977,836
STD	0,057	12,418	0,277	0,269	0,006	0,137	89194,429	387,802	129,267
LI	10,345	7330,521	55,666	80,968	0,405	33,714	22025615,689	95763,546	31921,182
LS	10,395	7341,406	55,908	81,203	0,410	33,834	22103798,053	96103,470	32034,490
Amplitude	0,050	10,885	0,242	0,235	0,005	0,120	78182,364	339,923	113,308

Output do cenário 7 com lavagens, fornecido pelo FlexSim

Cenário 7	Bobinas por hora	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Tempo final [hh:mm:ss]	Duração [h]	Capacidade Anual (230 dias)	Capacidade diária (pcs por dia)	Capacidade turno (pcs por turno)
1	10,6	7293,65	57,25	82,97	09:04:18	33,0717	22 532 883	97 969	32 656
2	10,6	7308,64	57,03	82,99	09:10:29	33,1747	22 462 886	97 665	32 555
3	10,6	7281,46	57,17	82,97	09:06:30	33,1083	22 507 929	97 861	32 620
4	10,6	7292,48	56,96	83,06	09:12:29	33,2081	22 440 338	97 567	32 522
5	10,6	7263,71	57	82,83	09:11:11	33,1864	22 454 989	97 630	32 543
6	10,5	7259,29	56,67	83,21	09:20:38	33,3439	22 348 923	97 169	32 390
7	10,6	7285,34	56,95	83,21	09:12:33	33,2092	22 439 587	97 563	32 521
8	10,6	7296,68	57,01	82,96	09:11:00	33,1833	22 457 057	97 639	32 546
9	10,7	7280,94	57,56	82,59	08:55:34	32,9261	22 632 494	98 402	32 801
10	10,6	7277,29	56,97	82,89	09:12:07	33,2019	22 444 469	97 585	32 528
11	10,5	7277,45	56,66	82,92	09:20:48	33,3467	22 347 061	97 161	32 387
12	10,6	7257,16	56,99	82,92	09:11:39	33,1942	22 449 728	97 608	32 536
13	10,6	7281,13	56,79	82,88	09:17:06	33,2850	22 388 463	97 341	32 447
14	10,6	7280,08	57,07	83,02	09:09:17	33,1547	22 476 436	97 724	32 575
15	10,7	7278,85	57,4	82,91	08:59:52	32,9978	22 583 339	98 188	32 729
16	10,6	7287,59	57,2	82,99	09:05:35	33,0931	22 518 320	97 906	32 635
17	10,6	7267,35	57,23	82,75	09:04:41	33,0781	22 528 531	97 950	32 650
18	10,6	7283,33	57,28	82,5	09:03:28	33,0578	22 542 350	98 010	32 670
19	10,6	7292,12	56,9	82,67	09:14:04	33,2344	22 422 520	97 489	32 496
20	10,6	7255,99	57,25	82,84	09:04:04	33,0678	22 535 533	97 981	32 660
AVG	10,600	7280,027	57,067	82,904	0,382	33,156	22475691,766	97720,399	32573,466
STD	0,046	13,873	0,229	0,178	0,004	0,108	73022,445	317,489	105,830
LI	10,580	7273,947	56,967	82,826	0,380	33,109	22443688,268	97581,253	32527,084
LS	10,620	7286,106	57,167	82,982	0,383	33,203	22507695,263	97859,545	32619,848
Amplitude	0,040	12,160	0,201	0,156	0,004	0,094	64006,995	278,291	92,764



## ANEXO C – Outputs sem operação de lavagem

### Output do cenário 1 sem lavagens, fornecido pelo FlexSim

Cenário 1	Bobinas por hora	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Tempo final [hh:mm:ss]	Duração [h]	Capacidade Anual (230 dias)	Capacidade diária (pcs por dia)	Capacidade turno (pcs por turno)
1	10,8	10001,2	64,48	87,82	08:44:09	32,7358	22 764 046	98 974	32 991
2	10,8	9988,93	64,6	87,77	08:41:22	32,6894	22 796 349	99 115	33 038
3	10,8	9995,61	64,49	87,81	08:43:53	32,7314	22 767 137	98 988	32 996
4	10,9	9986,68	65,08	87,82	08:29:49	32,4969	22 931 387	99 702	33 234
5	10,8	9987,42	64,49	87,7	08:44:19	32,7386	22 762 114	98 966	32 989
6	10,9	9977,89	65,31	87,96	08:24:23	32,4064	22 995 466	99 980	33 327
7	10,9	9979,25	65,53	87,99	08:19:04	32,3178	23 058 516	100 254	33 418
8	10,8	9985,05	64,9	88,18	08:34:12	32,5700	22 879 951	99 478	33 159
9	10,8	9986,08	64,46	87,83	08:45:24	32,7567	22 749 568	98 911	32 970
10	10,9	9987,42	65,1	88,06	08:29:18	32,4883	22 937 465	99 728	33 243
11	10,9	9982,72	65,09	87,49	08:29:34	32,4928	22 934 327	99 714	33 238
12	10,8	9987,42	64,79	88,3	08:36:29	32,6081	22 853 249	99 362	33 121
13	10,8	9987,42	64,18	87,49	08:51:37	32,8603	22 677 836	98 599	32 866
14	10,9	9991,52	65,22	88,28	08:26:24	32,4400	22 971 640	99 877	33 292
15	10,9	10001,82	65,08	88,06	08:29:53	32,4981	22 930 603	99 698	33 233
16	10,8	9990,15	64,77	88,59	08:37:42	32,6283	22 839 046	99 300	33 100
17	10,9	9987,42	65,15	87,96	08:27:48	32,4633	22 955 129	99 805	33 268
18	10,8	9992,43	64,75	87,86	08:37:50	32,6306	22 837 490	99 293	33 098
19	10,8	9986,89	64,86	88,52	08:33:08	32,5522	22 892 446	99 532	33 177
20	10,8	9976,89	64,59	87,71	08:41:43	32,6953	22 792 282	99 097	33 032
AVG	10,840	9988,011	64,846	87,960	0,358	32,590	22866302,282	99418,706	33139,569
STD	0,050	6,520	0,346	0,299	0,006	0,140	98396,358	427,810	142,603
LI	10,818	9985,153	64,694	87,829	0,355	32,529	22823178,177	99231,209	33077,070
LS	10,862	9990,868	64,998	88,091	0,360	32,651	22909426,387	99606,202	33202,067
Amplitude	0,044	5,715	0,303	0,262	0,005	0,123	86248,211	374,992	124,997



Output do cenário 2 sem lavagens, fornecido pelo FlexSim

Cenário 2	Bobinas por hora	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Tempo final [hh:mm:ss]	Duração [h]	Capacidade Anual (230 dias)	Capacidade diária (pcs por dia)	Capacidade turno (pcs por turno)
1	11,4	10695,66	67,37	86,97	07:17:41	31,2947	23 812 322	103 532	34 511
2	11,4	10695,66	67,11	87,13	07:23:28	31,3911	23 739 204	103 214	34 405
3	11,5	10694,97	67,87	87,34	07:06:22	31,1061	23 956 707	104 160	34 720
4	11,5	10695,6	67,78	87,08	07:08:24	31,1400	23 930 636	104 046	34 682
5	11,4	10695,63	67,6	86,87	07:12:26	31,2072	23 879 088	103 822	34 607
6	11,4	10694,97	67,7	87,4	07:10:14	31,1706	23 907 177	103 944	34 648
7	11,4	10695,66	67,53	86,87	07:14:03	31,2342	23 858 488	103 733	34 578
8	11,5	10695,66	67,88	87,39	07:06:11	31,1031	23 959 061	104 170	34 723
9	11,5	10695,66	67,88	86,63	07:06:04	31,1011	23 960 559	104 176	34 725
10	11,5	10695	67,9	87,17	07:05:48	31,0967	23 963 983	104 191	34 730
11	11,4	10695,66	67,23	86,89	07:20:41	31,3447	23 774 337	103 367	34 456
12	11,4	10695,63	67,1	86,73	07:23:44	31,3956	23 735 844	103 199	34 400
13	11,4	10695,63	67,39	87,63	07:17:10	31,2861	23 818 876	103 560	34 520
14	11,5	10691,21	67,86	87,18	07:06:32	31,1089	23 954 568	104 150	34 717
15	11,4	10695	67,24	87,22	07:20:26	31,3406	23 777 498	103 380	34 460
16	11,6	10695,66	68,39	86,83	06:54:56	30,9156	24 104 370	104 802	34 934
17	11,4	10695,63	67,71	87,66	07:09:57	31,1658	23 910 800	103 960	34 653
18	11,5	10696,65	68,05	86,85	07:02:22	31,0394	24 008 162	104 383	34 794
19	11,5	10695,66	67,97	87,44	07:04:16	31,0711	23 983 693	104 277	34 759
20	11,4	10695,66	67,52	87,19	07:14:19	31,2386	23 855 094	103 718	34 573
AVG	11,450	10695,343	67,654	87,124	0,299	31,188	23894523,397	103889,232	34629,744
STD	0,061	1,041	0,341	0,293	0,005	0,127	97458,876	423,734	141,245
LI	11,423	10694,887	67,504	86,995	0,297	31,132	23851810,161	103703,522	34567,841
LS	11,477	10695,799	67,804	87,252	0,302	31,243	23937236,633	104074,942	34691,647
Amplitude	0,053	0,913	0,299	0,256	0,005	0,111	85426,471	371,419	123,806

Output do cenário 3 sem lavagens, fornecido pelo FlexSim

Cenário 3	Bobinas por hora	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Tempo final [hh:mm:ss]	Duração [h]	Capacidade Anual (230 dias)	Capacidade diária (pcs por dia)	Capacidade turno (pcs por turno)
1	11,6	7581,57	68,77	85,29	06:46:46	30,7794	24 210 963	105 265	35 088
2	11,6	7581,57	68,76	85,04	06:46:51	30,7808	24 209 871	105 260	35 087
3	11,8	7581,57	69,61	85,41	06:28:49	30,4803	24 448 596	106 298	35 433
4	11,6	7581,57	68,93	85,34	06:43:20	30,7222	24 256 058	105 461	35 154
5	11,7	7581,57	69,25	85,29	06:36:25	30,6069	24 347 416	105 858	35 286
6	11,8	7581,57	69,98	85,55	06:21:01	30,3503	24 553 317	106 754	35 585
7	11,7	7581,57	69,41	84,9	06:33:00	30,5500	24 392 799	106 056	35 352
8	11,6	7581,57	68,83	85,42	06:45:20	30,7556	24 229 769	105 347	35 116
9	11,7	7581,57	69,52	85,51	06:30:38	30,5106	24 424 334	106 193	35 398
10	11,6	7583,57	68,62	85,29	06:49:58	30,8328	24 169 084	105 083	35 028
11	11,7	7581,57	69,23	84,93	06:36:49	30,6136	24 342 114	105 835	35 278
12	11,8	7581,57	69,84	85,73	06:23:49	30,3969	24 515 622	106 590	35 530
13	11,5	7581,57	68,3	84,66	06:56:53	30,9481	24 079 057	104 692	34 897
14	11,7	7581,57	69,19	85,12	06:37:44	30,6289	24 329 972	105 782	35 261
15	11,7	7583,86	69,04	85,66	06:40:59	30,6831	24 287 021	105 596	35 199
16	11,7	7581,57	69,2	84,67	06:37:21	30,6225	24 335 048	105 805	35 268
17	11,8	7581,57	69,63	85,32	06:28:22	30,4728	24 454 613	106 324	35 441
18	11,8	7581,57	69,7	85,54	06:26:52	30,4478	24 474 693	106 412	35 471
19	11,7	7583,86	68,98	85,47	06:42:03	30,7008	24 272 957	105 535	35 178
20	11,7	7581,57	69,05	85,05	06:40:42	30,6783	24 290 759	105 612	35 204
AVG	11,690	7581,899	69,192	85,260	0,276	30,628	24331203,061	105787,839	35262,613
STD	0,085	0,805	0,435	0,305	0,006	0,155	123067,479	535,076	178,359
LI	11,653	7581,546	69,001	85,126	0,273	30,560	24277266,360	105553,332	35184,444
LS	11,727	7582,252	69,383	85,393	0,279	30,696	24385139,762	106022,347	35340,782
Amplitude	0,075	0,706	0,382	0,267	0,006	0,136	107873,401	469,015	156,338

Output do cenário 4 sem lavagens, fornecido pelo FlexSim

Cenário 4	Bobinas por hora	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Tempo final [hh:mm:ss]	Duração [h]	Capacidade Anual (230 dias)	Capacidade diária (pcs por dia)	Capacidade turno (pcs por turno)
1	11,8	9137,34	69,75	84,72	06:25:51	30,4308	24 488 321	106 471	35 490
2	11,7	9151,83	67,17	84,54	06:38:06	30,6350	24 325 118	105 761	35 254
3	11,8	9180,5	69,81	85,04	06:24:38	30,4106	24 504 649	106 542	35 514
4	11,7	9142,5	69,02	84,49	06:41:17	30,6881	24 283 063	105 579	35 193
5	11,6	9131,22	68,66	84,43	06:49:01	30,8169	24 181 502	105 137	35 046
6	11,7	9165,69	68,95	84,56	06:42:53	30,7147	24 261 981	105 487	35 162
7	11,6	9130,11	68,58	84,13	06:50:51	30,8475	24 157 549	105 033	35 011
8	11,6	9154,41	68,87	84,48	06:44:36	30,7433	24 239 401	105 389	35 130
9	11,7	9128	69,05	84,42	06:40:35	30,6764	24 292 299	105 619	35 206
10	11,6	9165,69	68,72	84,53	06:47:49	30,7969	24 197 206	105 205	35 068
11	11,8	9145,39	69,86	84,25	06:23:25	30,3903	24 521 000	106 613	35 538
12	11,8	9111,25	69,58	85,05	06:29:19	30,4886	24 441 914	106 269	35 423
13	11,6	9174,7	68,91	84,7	06:43:42	30,7283	24 251 234	105 440	35 147
14	11,7	9192,42	69,11	84,61	06:39:16	30,6544	24 309 689	105 694	35 231
15	11,7	9145,39	69,08	84,51	06:40:02	30,6672	24 299 560	105 650	35 217
16	11,7	9128,32	69,21	84,42	06:37:14	30,6206	24 336 593	105 811	35 270
17	11,6	9154,41	68,83	84,69	06:45:18	30,7550	24 230 206	105 349	35 116
18	11,6	9140,24	68,36	84,55	06:55:34	30,9261	24 096 143	104 766	34 922
19	11,8	9117,37	69,73	84,88	06:26:11	30,4364	24 483 851	106 452	35 484
20	11,6	9156,99	68,8	84,53	06:46:06	30,7683	24 219 706	105 303	35 101
AVG	11,685	9147,689	69,003	84,577	0,277	30,660	24306049,252	105678,475	35226,158
STD	0,081	21,075	0,612	0,228	0,006	0,155	122920,193	534,436	178,145
LI	11,649	9138,452	68,734	84,477	0,275	30,592	24252177,102	105444,248	35148,083
LS	11,721	9156,925	69,271	84,676	0,280	30,728	24359921,403	105912,702	35304,234
Amplitude	0,071	18,473	0,537	0,200	0,006	0,136	107744,300	468,453	156,151

Output do cenário 5 sem lavagens, fornecido pelo FlexSim

Cenário 5	Bobinas por hora	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Tempo final [hh:mm:ss]	Duração [h]	Capacidade Anual (230 dias)	Capacidade diária (pcs por dia)	Capacidade turno (pcs por turno)
1	11,8	8135,46	69,8	84,35	06:24:50	30,4139	24 501 964	106 530	35 510
2	11,8	8161,66	70,05	83,87	06:19:34	30,3261	24 572 884	106 839	35 613
3	11,8	8150,86	69,75	84,06	06:25:42	30,4283	24 490 332	106 480	35 493
4	11,9	8129,66	70,17	83,9	06:17:01	30,2836	24 607 369	106 989	35 663
5	11,8	8168,07	69,71	83,61	06:26:36	30,4433	24 478 266	106 427	35 476
6	11,8	8140,94	69,57	83,73	06:29:39	30,4942	24 437 461	106 250	35 417
7	11,7	8150,68	69,22	84,04	06:37:08	30,6189	24 337 918	105 817	35 272
8	11,8	8140,63	69,89	83,93	06:22:58	30,3828	24 527 053	106 639	35 546
9	11,8	8144,27	69,86	83,84	06:23:26	30,3906	24 520 776	106 612	35 537
10	11,8	8156,48	69,7	84,1	06:26:54	30,4483	24 474 246	106 410	35 470
11	11,8	8178,12	70,09	83,78	06:18:38	30,3106	24 585 495	106 893	35 631
12	11,8	8146,12	69,65	84,11	06:27:58	30,4661	24 459 965	106 348	35 449
13	11,9	8190,02	70,33	84,03	06:13:45	30,2292	24 651 688	107 181	35 727
14	11,8	8135,77	69,89	83,74	06:22:46	30,3794	24 529 744	106 651	35 550
15	11,8	8151,92	69,82	83,63	06:24:24	30,4067	24 507 783	106 556	35 519
16	11,8	8157,41	69,75	83,97	06:25:52	30,4311	24 488 097	106 470	35 490
17	11,7	8157,1	69,1	83,83	06:39:39	30,6608	24 304 623	105 672	35 224
18	11,8	8140,02	69,8	84,3	06:24:42	30,4117	24 503 754	106 538	35 513
19	11,8	8162,58	69,69	84,19	06:26:58	30,4494	24 473 353	106 406	35 469
20	11,8	8179,36	69,84	84,03	06:23:58	30,3994	24 513 606	106 581	35 527
AVG	11,800	8153,857	69,784	83,952	0,267	30,419	24498318,807	106514,430	35504,810
STD	0,046	16,018	0,283	0,205	0,004	0,099	79951,252	347,614	115,871
LI	11,780	8146,836	69,660	83,862	0,266	30,375	24463278,626	106362,081	35454,027
LS	11,820	8160,877	69,908	84,042	0,269	30,462	24533358,988	106666,778	35555,593
Amplitude	0,040	14,040	0,248	0,179	0,004	0,087	70080,362	304,697	101,566

Output do cenário 6 sem lavagens, fornecido pelo FlexSim

Cenário 6	Bobinas por hora	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Tempo final [hh:mm:ss]	Duração [h]	Capacidade Anual (230 dias)	Capacidade diária (pcs por dia)	Capacidade turno (pcs por turno)
1	12,2	4800,07	65,69	78,61	05:37:21	29,6225	25 156 553	109 376	36 459
2	12,1	4805,3	65,41	78,83	05:43:15	29,7208	25 073 321	109 014	36 338
3	12,2	4803,29	65,53	78,61	05:40:47	29,6797	25 108 052	109 165	36 388
4	12	4812,67	64,47	78,01	06:03:49	30,0636	24 787 441	107 771	35 924
5	12,2	4799,69	65,52	79,16	05:40:53	29,6814	25 106 642	109 159	36 386
6	12,2	4794,12	65,58	78,92	05:39:46	29,6628	25 122 394	109 228	36 409
7	12	4791,85	64,66	78,79	05:59:37	29,9936	24 845 291	108 023	36 008
8	12,1	4785,37	65,42	78,43	05:43:11	29,7197	25 074 259	109 019	36 340
9	12,2	4779,61	65,63	79,01	05:38:43	29,6453	25 137 224	109 292	36 431
10	12,1	4808,4	65,2	78,56	05:47:55	29,7986	25 007 877	108 730	36 243
11	12,2	4833,27	65,75	78,44	05:36:07	29,6019	25 174 022	109 452	36 484
12	12,2	4825,43	65,94	78,56	05:31:57	29,5325	25 233 218	109 710	36 570
13	12,1	4828,81	65,16	78,7	05:48:40	29,8111	24 997 391	108 684	36 228
14	12,1	4847,1	65,26	78,49	05:46:30	29,7750	25 027 708	108 816	36 272
15	12,1	4849,94	65,34	79,28	05:44:48	29,7467	25 051 546	108 920	36 307
16	12,1	4839,64	65,23	78,5	05:47:11	29,7864	25 018 138	108 775	36 258
17	12,1	4820,81	65,28	78,25	05:46:09	29,7692	25 032 612	108 837	36 279
18	12,3	4831,08	66,23	79,12	05:25:56	29,4322	25 319 189	110 083	36 694
19	12	4777,34	64,77	78	05:57:10	29,9528	24 879 162	108 170	36 057
20	12,1	4817,44	64,1	78,92	05:50:01	29,8336	24 978 538	108 602	36 201
AVG	12,130	4812,562	65,309	78,660	0,239	29,741	25056528,961	108941,430	36313,810
STD	0,080	21,678	0,503	0,352	0,006	0,150	126484,406	549,932	183,311
LI	12,095	4803,061	65,088	78,505	0,236	29,676	25001094,726	108700,412	36233,471
LS	12,165	4822,062	65,529	78,814	0,242	29,807	25111963,196	109182,449	36394,150
Amplitude	0,070	19,002	0,441	0,309	0,005	0,132	110868,470	482,037	160,679

Output do cenário 7 sem lavagens, fornecido pelo FlexSim

Cenário 7	Bobinas por hora	Distância percorrida [m]	Ocupação da CSG [%]	Ocupação do Operador [%]	Tempo final [hh:mm:ss]	Duração [h]	Capacidade Anual (230 dias)	Capacidade diária (pcs por dia)	Capacidade turno (pcs por turno)
1	12,9	4956,49	69,58	83,82	04:18:59	28,3164	26 316 915	114 421	38 140
2	13	4959,83	69,89	83,84	04:13:02	28,2172	26 409 403	114 823	38 274
3	12,8	4958,28	69,17	83,41	04:26:51	28,4475	26 195 624	113 894	37 965
4	12,9	4959,07	69,75	83,66	04:15:45	28,2625	26 367 094	114 640	38 213
5	13	4990,51	69,91	83,82	04:12:41	28,2114	26 414 864	114 847	38 282
6	13	4959,43	69,89	84,14	04:13:07	28,2186	26 408 103	114 818	38 273
7	12,8	4948,69	68,81	83,57	04:33:40	28,5611	26 091 422	113 441	37 814
8	13,1	4955,86	70,62	83,8	03:59:23	27,9897	26 624 058	115 757	38 586
9	12,8	4953,81	69,18	83,55	04:26:35	28,4431	26 199 717	113 912	37 971
10	12,9	4924,18	68,58	83,34	04:18:59	28,3164	26 316 915	114 421	38 140
11	13	4963,61	70,04	83,91	04:10:08	28,1689	26 454 718	115 021	38 340
12	12,8	4937,31	69,12	83,55	04:27:39	28,4608	26 183 351	113 841	37 947
13	13	4944,44	70,14	83,52	04:08:23	28,1397	26 482 138	115 140	38 380
14	13	4957,15	70	83,63	04:10:55	28,1819	26 442 462	114 967	38 322
15	12,9	4950,32	69,36	83,58	04:23:09	28,3858	26 252 532	114 141	38 047
16	12,8	4943,45	69,23	82,73	04:25:39	28,4275	26 214 053	113 974	37 991
17	12,9	4972,77	69,41	83,31	04:22:10	28,3694	26 267 698	114 207	38 069
18	12,9	4952,22	69,61	83,66	04:18:25	28,3069	26 325 696	114 460	38 153
19	12,9	4923	69,59	82,88	04:18:45	28,3125	26 320 530	114 437	38 146
20	12,9	4949,5	69,48	83,34	04:20:45	28,3458	26 289 578	114 303	38 101
AVG	12,915	4952,996	69,568	83,553	0,179	28,304	26328843,560	114473,233	38157,744
STD	0,088	15,011	0,484	0,332	0,006	0,134	125161,311	544,180	181,393
LI	12,877	4946,417	69,356	83,408	0,177	28,245	26273989,197	114234,736	38078,245
LS	12,953	4959,575	69,780	83,698	0,182	28,363	26383697,923	114711,730	38237,243
Amplitude	0,077	13,158	0,424	0,291	0,005	0,118	109708,726	476,994	158,998